



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE
DEFORMACIONES UNITARIAS
EN ELEMENTOS
ESTRUCTURALES POR MEDIO
DE DIFERENTES TIPOS DE
SENSORES**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A N

Juan Carlos Flores Islas

Omar Alexis Zavala Pacheco

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Gerardo Rodríguez Gutiérrez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por haber contribuido en nuestra formación académica.

Al Dr. Gerardo Rodríguez Gutiérrez por la dirección de este trabajo, siendo el pilar más importante con sus enseñanzas y atenciones a lo largo de esta etapa. Por su calidad humana que ha dejado un gran impacto en nuestras vidas

A todos nuestros compañeros, amigos y profesores con los que nos tocó coincidir en los pasillos de la facultad de ingeniería.

Al Instituto de Ingeniería, por el apoyo dado durante esta experiencia que se concluyó exitosamente. Así como a todo el personal del Instituto de Ingeniería, haciendo especial mención al Dr. Héctor Guerrero Bobadilla por permitirnos colaborar en sus investigaciones, así como al Ing. Roberto A. Sánchez y a la Ing. Julia G. Villa Montes por proporcionarnos las facilidades para las pruebas realizadas en sus experimentos, a Ponciano Trinidad López y al M. en I. Miguel Ángel Mendoza García por su apoyo constante durante este ciclo.

A Daniel Gama, Sebastián Soto por sus colaboraciones en los experimentos realizados en la presente tesis.

Al M. en I. José Juan Pérez Fabila por su experiencia y conocimientos compartidos.

A los profesores y sinodales Ing. Jorge Luis Caballero Aguilar, M. en I. Héctor Javier Guzmán Olgún, M. en I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose y Ing. Marcos Trejo Hernández por su apoyo para que este trabajo pudiera ser presentado.

Flores Islas Juan Carlos

A mi mamá Angélica María Islas Sánchez por el amor que siempre me ha dado, por sus enseñanzas de vida y por el sacrificio que ha hecho para que yo pueda ser feliz y también una persona de valor.

A mi papá Francisco Flores Solares por el amor y tiempo que ha dedicado a mi formación, por su apoyo en tiempos difíciles y por ayudarme a disfrutar mi infancia.

A mi abuela Socorro Solares quien cuidó de mí e influyó positivamente en mi formación cuando yo era pequeño.

A mi abuelo Pablo Flores Solares (†) quien con su carácter fuerte logró sacar adelante a su familia, razón por la cual yo puedo escribir esto.

A mi hermano Eduardo Flores Islas por todas las experiencias que hemos vivido y por hacer de la escuela algo más agradable y más sencillo.

A Montserrat Ibarra por su alegría y por apoyarme en los momentos más difíciles.

A mi tío Pablo Flores por inculcar en mí uno de los pilares de mi vida, el deporte.

A Alexis Zavala por ser mi compañero de tesis y por trabajar muy bien en equipo.

A todos mis familiares y amigos por su apoyo y conocimiento compartido.

A todos los profesores que he tenido por la gran manera en que transmitieron su experiencia y conocimientos durante clase.

Zavala Pacheco Omar Alexis

Sabiendo que el tiempo que me ha tomado el escribir este trabajo no se compara con el tiempo necesario para agradecer a todos aquellos quienes me han alentado para llegar a este día, tanto a mis amigos, compañeros y profesores, solo me queda decir que cada persona sabe lo agradecido que me encuentro. Gracias a todos y cada uno de ellos.

A mi madre:

Por su eterno amor incondicional a lo largo de mi vida, en la cual todo su esfuerzo se ve reflejado en este momento. La vida no me alcanzaría para encontrar la forma de agradecer todo lo que ha hecho por mí.

A mi padre (†):

Por haberme cuidado de mis hermanos y de mí y por enseñarme el valor del trabajo y el esfuerzo.

A mi hermano y hermana:

Por haber compartido sus vidas conmigo, dándome muchas enseñanzas de la vida.

A mis abuelos Darío (†) y Agripina (†):

Por haber llenado mi vida de alegría y amor en cada momento que compartimos juntos.

A mi tía Martha Pacheco

Por ser mi segunda madre, por su amor y cuidado a través de los años.

Al Doctor Gerardo Rodríguez

Por su apoyo y enseñanzas que me ha dado desde aquel enero de 2018, por guiarme a través de estos años con su increíble calidad humana.

A mi compañero y amigo Juan Carlos Flores:

Por la paciencia y el apoyo que me ha brindado a lo largo de la universidad

A B.M.R.C (†):

Por aquello que soñábamos cumplir juntos pero que la vida no lo permitió, gracias por haber cambiado mi vida para bien.

Introducción

En este escrito se presenta un estudio para la obtención de uno de los parámetros fundamentales en el área de la mecánica de materiales, la deformación. Este tipo de estudio se remonta más allá del siglo XIV con figuras como Leonardo Da Vinci o como Galileo Galilei en el siglo XVII y complementados posteriormente en el siglo XVIII con los estudios de Robert Hooke.

Desde que el ser humano se dio cuenta de que los sentidos que poseía no le eran suficientes para entender una infinidad de fenómenos que ocurrían a su alrededor, buscó la manera de usar herramientas adicionales para extender la comprensión de su entorno, lo cual resultó en instrumentos de medición de todo tipo. Específicamente para el desarrollo de esta tesis, el interés se centra en la aplicación de diversos instrumentos de medición para la obtención de uno de los parámetros más importantes dentro de la mecánica de los materiales como es la deformación.

Los instrumentos de medición de deformación que se utilizaron en este trabajo y que están basados en distintos principios de funcionamiento fueron: deformímetros extensométricos (DE), sensores de deformación bridge diagnostics inc, conocidos como tipo BDI y sensores de cuerda vibrante (SCV).

Otro tipo de sensor con un principio de operación diferente y que también fue usado para realizar este trabajo, fueron sensores de fibra óptica (SFO), los cuales ofrecen una alternativa sencilla y eficaz para la obtención de deformaciones.

De los experimentos realizados en esta tesis, se tienen casos que pueden ser fácilmente replicados únicamente contando con el equipo necesario para la operación de los sensores, como el caso de estudio de dos barras metálicas en voladizo, cuya carga fue aplicada manualmente mediante pesas de metal en uno de sus extremos, hasta el caso de experimentos que requieren de la colaboración de personal capacitado como el caso de estudio de un muro de adobe o el estudio de disipadores de energía sísmica de diferentes geometrías y tamaños.

Finalmente se presentan las conclusiones que resultan del uso de los sensores antes mencionados, así como comentarios acerca de su desempeño y recomendaciones finales que puedan servir al lector para una buena selección del sensor que se adecue mejor a sus necesidades.

Abreviaturas

BDI - Bridge Diagnostics Inc.

DE - Deformímetro extensométrico

LED - Light Emitting Diode

P3 – Puente Vishay Modelo P3

SCV - Sensor de cuerda vibrante

SFO - Sensor de fibra óptica

Objetivos generales

En esta tesis de licenciatura se establecieron los siguientes objetivos:

- Elaborar un trabajo que sirva como guía para la elección de un tipo de sensor de deformación, incluyendo aspectos como la instalación, metodología de captura de datos, así como el procesamiento y la interpretación de la información.
- Observar y evaluar experimentalmente el comportamiento de los sensores de deformación utilizados en la presente tesis. Y así poder contribuir con recomendaciones de uso.
- Realizar una comparación entre sensores, con base en las ventajas y desventajas presentadas. Teniendo dos grupos principales de sensores: los eléctricos y los ópticos.

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	I
INTRODUCCIÓN.....	IV
ABREVIATURAS.....	V
OBJETIVOS GENERALES.....	VI
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES.....	1
1.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE MEDICIONES DE DEFORMACIÓN	1
1.2 DEFINICIÓN DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN UNITARIA	7
1.3 LA IMPORTANCIA DE LA OBTENCIÓN DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	8
1.4 NUEVAS NECESIDADES EN LA MEDICIÓN DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA.....	9
CAPÍTULO 2 SENSORES DE DEFORMACIÓN ELÉCTRICOS	11
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DEFORMÍMETROS ELÉCTRICOS (DEFORMÍMETROS EXTENSOMÉTRICOS Y TRANSDUCTORES DE DEFORMACIÓN).....	11
2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DEFORMÍMETROS DE CUERDA VIBRANTE	19
CAPÍTULO 3 SENSORES DE DEFORMACIÓN DE FIBRA ÓPTICA ...	25
3.1 FUNDAMENTOS DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA (SFO).....	25
3.2 EL PRINCIPIO DE DIFRACCIÓN DE LAS REJILLAS DE BRAGG EN LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA	33

CAPÍTULO 4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN ELÉCTRICOS Y ÓPTICOS	35
4.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN ELÉCTRICOS	35
4.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN ÓPTICOS	40
 CAPÍTULO 5 MEDICIONES DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL ...	42
5.1 METODOLOGÍA PARA LA INSTALACIÓN DE SENSORES DE DEFORMACIÓN	42
5.2 PROCEDIMIENTO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS	62
5.3 EL CASO DE DOS BARRAS METÁLICAS EN VOLADIZO	94
<i>5.3.1 Barra Tipo 01</i>	<i>94</i>
5.3.1.1 Descripción del experimento de la barra Tipo 01	94
5.3.1.2 Instrumentación de la barra Tipo 01	98
5.3.1.3 Análisis e interpretación de resultados de la barra Tipo 01	99
5.3.1.4 Modelo analítico de la barra Tipo 01	105
5.3.1.5 Comparación entre resultados analíticos y experimentales de la barra Tipo 01.....	126
<i>5.3.2 Barra Tipo 02</i>	<i>127</i>
5.3.2.1 Descripción del experimento barra Tipo 02	127
5.3.2.2 Instrumentación barra Tipo 02	130
5.3.2.3 Análisis e interpretación de resultados barra Tipo 02	132
5.3.2.4 Modelo analítico de la barra Tipo 02.....	138

5.3.2.5 Comparación entre resultados analíticos y experimentales de la barra Tipo 02.....	153
5.4 PRUEBA DE UN MURO SUJETO A CARGA LATERAL	155
5.4.1 Descripción del experimento	155
5.4.2 Instrumentación.....	159
5.4.3 Análisis e interpretación de resultados.....	162
5.5 PRUEBAS EXPERIMENTALES EN DISIPADORES DE ENERGÍA	172
5.5.1 Disipador Tipo 01	172
5.5.1.1 Descripción del experimento disipador Tipo 01	172
5.5.1.2 Instrumentación del disipador Tipo 01.....	176
5.5.1.3 Análisis e interpretación de resultados del disipador Tipo 01	179
5.5.2 Disipador Tipo 02	189
5.5.2.1 Descripción del experimento disipador Tipo 02	189
5.5.2.2 Instrumentación del disipador Tipo 02.....	191
5.5.2.3 Análisis e interpretación de resultados del disipador Tipo 02	193
5.5.3 Disipador Tipo 03	202
5.5.3.1 Descripción del experimento disipador Tipo 03	202
5.5.3.2 Instrumentación del disipador Tipo 03.....	204
5.5.3.3 Análisis e interpretación de resultados del disipador Tipo 03	206
5.5.4 Disipador Tipo 04	217

5.5.4.1 Descripción del experimento disipador Tipo 04	217
5.5.4.2 Instrumentación del disipador Tipo 04	220
5.5.4.3 Análisis e interpretación de resultados del disipador Tipo 04	222
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES FINALES	237
6.1 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES	237
6.2 SUGERENCIAS DE APLICACIÓN PARA CADA TIPO DE SENSOR	237

Capítulo 1

Antecedentes

En este capítulo se hace una breve reseña histórica acerca del desarrollo del concepto de deformación de los cuerpos, el cual es fundamental en el entendimiento del comportamiento de los elementos y sistemas estructurales.

1.1 Breve reseña histórica de mediciones de deformación

Dentro de los principales personajes que se inclinaron por estudiar este fenómeno, Leonardo da Vinci (figura 1.1) es un personaje relevante. A finales del siglo XIV y principios del XV, Leonardo ya experimentaba y estudiaba una gran diversidad de temas como la aritmética, geometría, pintura, perspectiva, arquitectura; estática y mecánica; medicina, anatomía y otros. En el campo del comportamiento de materiales y construcción, Leonardo Da Vinci habla de resistencia de ménsulas y vigas, de arcos, cimentaciones, soportes y deformación. (*Clius Sylva, 1987*)

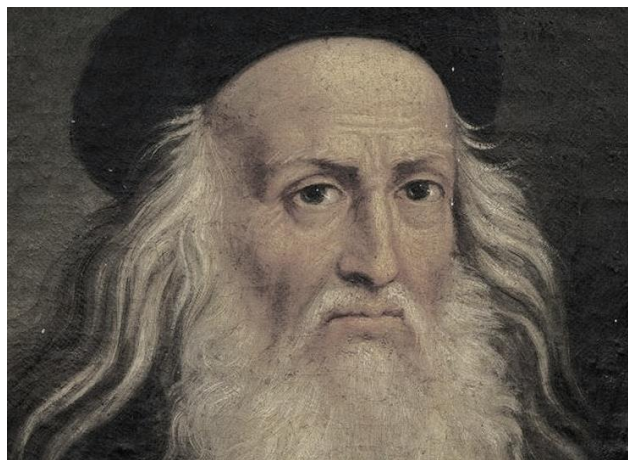


Figura 1.1 Leonardo da Vinci (Referencia 1.1)

Leonardo encuentra que la deformación y la fuerza están ligadas y se ocupa de analizar dicha relación en vigas. Con base en sus estudios y

observaciones da Vinci establece las siguientes conclusiones en el campo de mecánica de materiales.

“Si un cuerpo tiene un grosor uniforme, la parte más alejada de los extremos se doblará con más facilidad que cualquier otra”

“Si quieres doblar dos cosas de igual grosor, doblarás la más larga con una fuerza menor que la más corta” (*Ms A. Bibl. Inst. f 33r., citado por Clius Sylva, 1987*).

En su escrito titulado “*Della piegetura delle molle*” (De la flexión de los resortes), Leonardo menciona: “Si se dobla un resorte recto (figura 1.2), necesariamente la parte convexa se vuelve más delgada y la parte cóncava más gruesa, esta modificación sigue la regla piramidal y por lo tanto en el centro del resorte no habrá nunca modificación”. La cita anterior hace énfasis en cómo Leonardo da Vinci entiende el comportamiento de una viga sujeta a flexión (el término “regla piramidal” se refiere a un comportamiento lineal y con “centro” se refiere al eje neutro en donde no existen cambios, es decir no hay deformación).



Figura 1.2 Resorte sometido a flexión (Referencia 1.2)

Para abordar el problema de flexión en vigas, Leonardo realizó experimentos como el de una viga apoyada en sus dos extremos a la cual le colocaba diferentes cargas en diferentes posiciones (figura 1.3) tales que provocaran la misma flecha. Se puede decir que Leonardo da Vinci

midió una deformación global en la viga, pero sabía que eran provocadas por deformaciones locales en segmentos más pequeños de la viga.

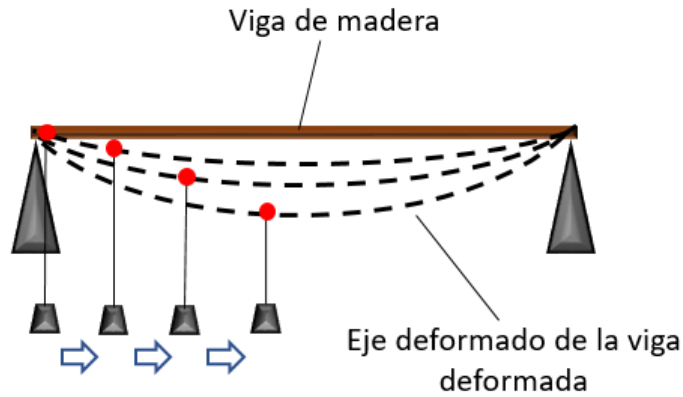


Figura 1.3 Bosquejos de la prueba de una viga de Leonardo da Vinci (Clius Sylva, 1987)

Galileo Galilei (figura 1.4) en el siglo XVII realizó una obra importante en el campo de resistencia de materiales, la obra es llamada "Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias". Las dos nuevas ciencias son la "Resistencia de materiales" y "El movimiento local". En esta obra, Galileo Galilei aborda el tema de resistencia de materiales, con ocho proposiciones, en donde habla principalmente de la relación de la resistencia y deformación de una viga con las dimensiones de su sección transversal (figura 1.5). (E. Jaramillo, 2011)

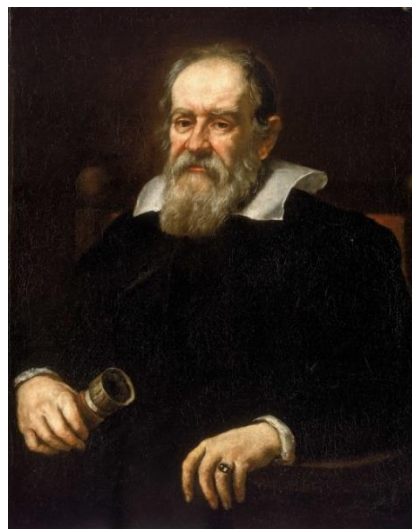


Figura 1.4 Galileo Galilei (Referencia 1.3)



Figura 1.5 Bosquejos de ensayos de resistencia de Galileo (Gómez I., 2008)

En el siglo XVII Robert Hooke (figura 1.6) en su obra sobre resortes, declara que la deformación es directamente proporcional a la carga aplicada (Ley de Hooke), con lo que sienta las bases de la teoría de la elasticidad.



Figura 1.6 Robert Hooke (Referencia 1.4)

La ley de Hooke se establece de la siguiente manera

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.1)$$

Donde:

σ Esfuerzo sobre la sección transversal

E Módulo de Young (o módulo de elasticidad)

ε Deformaciones unitarias

Los personajes mencionados con anterioridad formaron el concepto de deformación el cual está relacionado en forma cualitativa con el cambio de forma de los cuerpos al estar sujetos a un sistema de fuerzas. Todos ellos realizaron experimentos para poder entender este fenómeno y consecuentemente llevaron a cabo mediciones para determinar cuantitativamente la deformación, algunas veces de forma indirecta o intuitiva.

Posteriormente, con los avances en el conocimiento de la mecánica de materiales y el desarrollo de nuevas tecnologías, fueron surgiendo instrumentos de medición cada vez más sofisticados que permitieron cuantificar el cambio de forma de los cuerpos en función de una escala numérica. Es así como en la historia de la obtención cuantitativa de la deformación de los cuerpos se encuentra desde el uso de una simple regla, hasta los sensores de fibra óptica que se usan en la actualidad.

Un buen ejemplo de la evolución de los instrumentos de medición de la deformación son los extensómetros, los cuales están diseñados para medir el cambio de forma de un cuerpo de forma directa. Los primeros extensómetros fueron mecánicos y la lectura se obtenía de forma directa en una regla. Posteriormente se les acopló un lector de aguja (figura 1.7) y hoy en día arrojan las lecturas obtenidas de forma digital y pueden conectarse a una computadora y registrar los valores en tiempo real.



Figura 1.7 Extensómetro mecánico con lector de aguja (Referencia 1.5)

Otro ejemplo de instrumento es el deformímetro extensométrico o deformímetro eléctrico (figura 1.8) inventado por los ingenieros Edward E. y Arthur Ruge en 1983. Son los instrumentos de medición de deformación más comúnmente utilizados. Hoy en día existen muchas presentaciones de deformímetros eléctricos, algunas permanentes, otras desmontables.

Los deformímetros son instrumentos de medición y tienen como uno de sus componentes principales a los transductores. Un transductor es un dispositivo capaz transformar una causa física en un tipo de señal, generalmente eléctrica en otra señal de naturaleza diferente, pero de características dependientes de las que recibió. Por ejemplo, un transductor de desplazamiento, en el cual se recibe un estímulo mecánico y se suministra un voltaje dependiente del estímulo mecánico.

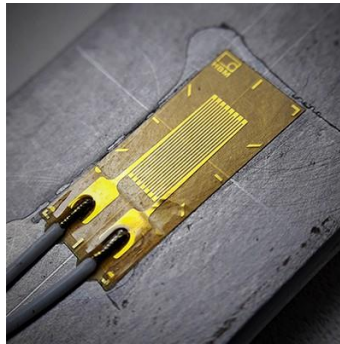


Figura 1.8 Deformímetro extensométrico (Referencia 1.6)



Figura 1.9 Sensor de desplazamiento (Referencia 1.7)

En cuanto a los sensores de fibra óptica (figura 1.10), su funcionamiento se basa en los principios para confinar la luz por refracción y utilizando el cristal como medio para transmitir la luz a grandes distancias. Así, los estudios se han concentrado en la mejora de la tecnología para transmitir la luz a través de cables de fibra. Hoy en día, gracias al campo de las telecomunicaciones, los sensores de fibra óptica han adquirido características que permiten competir con otro tipo de sensores de deformación, incluso en precio. (*Branko Glišić, Daniele Inaudi. 2007*)

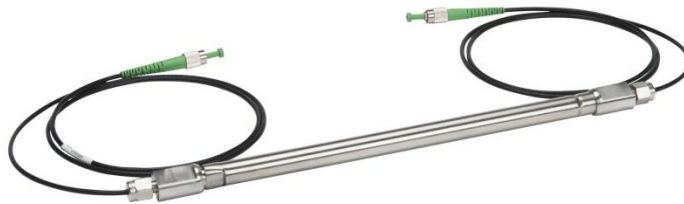


Figura 1.10 Sensor de fibra óptica tubular y desmontable (Referencia 1.8)

1.2 Definición de esfuerzo y deformación unitaria

En mecánica de materiales un esfuerzo es una fuerza que actúa sobre una superficie. Las dimensiones del esfuerzo son $[FL^{-2}]$ y sus unidades en el sistema internacional son Pascales (Pa), es decir (N/m^2) . (*Cevera Ruíz 2003*)

Dentro de la mecánica de los materiales, tradicionalmente se definen dos tipos de esfuerzos, el esfuerzo normal cuya dirección es perpendicular al plano y el esfuerzo tangencial el cual es paralelo al plano. (*Cevera Ruíz 2003*).

El concepto de esfuerzo va de la mano al concepto de deformación, pues según la Ley de Hooke, las deformaciones en un material son directamente proporcionales al esfuerzo aplicado (ecuación 1.1).

Para entender, el concepto de deformación unitaria, comenzaremos por definir el concepto de deformación para el campo de mecánica de materiales.

El concepto de deformación se refiere a una variación de la forma de algún objeto sujeto a un sistema de fuerzas que provocan que en dicho cuerpo se originen modificaciones en sus dimensiones originales. Estas deformaciones pueden clasificarse en deformaciones angulares (que son causadas por esfuerzos tangenciales) y deformaciones lineales (las cuales son causadas por esfuerzos normales).

La deformación unitaria, es una variación o un cambio de longitud dividida entre la longitud inicial del objeto (ecuación 1.2) y es provocada únicamente por esfuerzos normales.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.2)$$

Donde:

ε Deformación unitaria en cierta dirección del elemento

ΔL Es el cambio de longitud en la misma dirección

L Es la longitud inicial en la misma dirección.

En otras palabras, puede decirse que este alargamiento o cambio de longitud es un resultado acumulativo del estiramiento del material sobre la longitud L de la barra. Si se supone que el material es el mismo en toda la barra y si se considera la mitad de la longitud L , la deformación unitaria o el alargamiento por unidad de longitud será el mismo. (*Timoshenko, 1984*)

1.3 La importancia de la obtención de la deformación unitaria en el análisis del comportamiento de elementos estructurales

Esfuerzos, deformaciones unitarias y desplazamientos son tres parámetros esenciales para el monitoreo de la mayoría de las estructuras. (*Inaudi Daniele, 1997*)

La importancia de conocer los esfuerzos a los que está sometido un elemento o sistema estructural reside en que si el material que lo conforma falla cuando dichos esfuerzos superan su límite de resistencia, el sistema estructural podría colapsarse y traer consecuencias catastróficas.

La obtención experimental esfuerzos por medio de una medición directa es una tarea complicada. Sin embargo, lo que es más viable es medir en forma directa la deformación unitaria la cual según la Ley de Hooke es proporcional al esfuerzo aplicado. De esta forma a través de la deformación unitaria, es posible determinar otros parámetros importantes en el comportamiento de un elemento o sistema estructural. Por ejemplo, en el caso de una viga, gracias a la obtención de la deformación unitaria, es posible conocer parámetros como; la posición del eje neutro (como referencia de daño estructural), la curvatura de la viga (como referencia para conocer el momento flexionante), el esfuerzo en el material y parámetros dinámicos como la frecuencia natural. (Siguardotir, B. Glissic ,2015)

1.4 Nuevas necesidades en la medición de la deformación unitaria

Debido al incremento en la preocupación de las consecuencias económicas y efectos sociales que puede traer consigo el deterioro y los daños de la infraestructura civil, se ha observado la necesidad de llevar a cabo procesos de monitoreo de la salud estructural con herramientas de detección más sofisticadas y confiables. (Chang P., 2003)

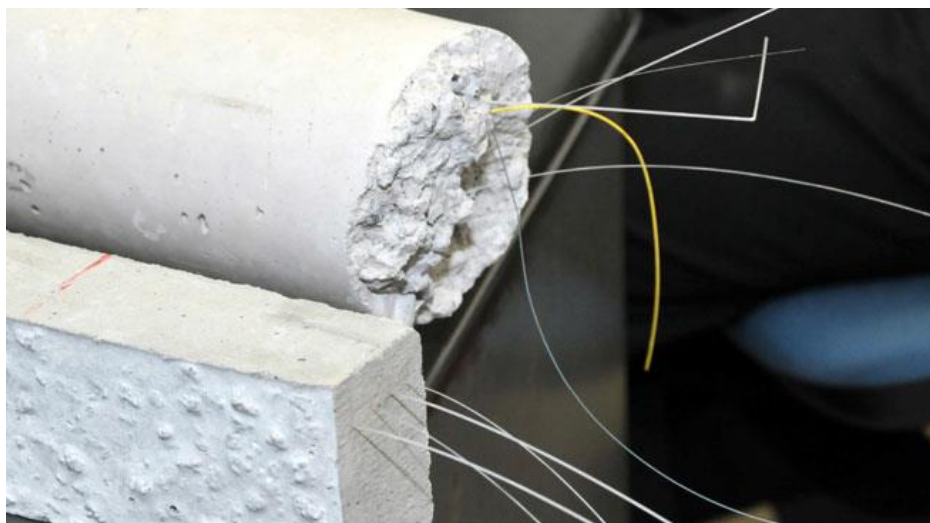


Figura 1.11 Cable de fibra óptica embebido en un espécimen de concreto. Imagen Recuperada de: Laura Romero, 08 de junio de 2015, Gaceta UNAM

Actualmente se requieren sensores de deformación que sean económicos, sencillos de instalar, fáciles de adquirir, que arrojen lecturas confiables, que sean capaces de conectarse a un sistema de monitoreo en tiempo real y que puedan permanecer en la estructura por un tiempo prolongado (figura 1.11). Lo anterior con el objeto de que la estructura pueda ser monitoreada cuando lo requiera o bien para realizar un monitoreo continuo. Por ejemplo, en infraestructura civil, el monitoreo continuo requiere el uso de sensores que puedan soportar daños causados por el entorno en el que se encuentran, ya que se espera que algunos operen por periodos de 50 hasta 100 años. (Chang P. 2003).

Capítulo 2

Sensores de deformación eléctricos

En el presente capítulo se hace una descripción de los principios de funcionamiento de los diferentes sensores de deformación eléctricos que se usarán en la presente tesis. Se llevará al lector de forma en la que se entienda como se interpretan las acciones externas para reportar valores de deformación.

2.1 Principio de funcionamiento de los deformímetros eléctricos (deformímetros extensométricos y transductores de deformación)

Uso de deformímetros extensométricos para cálculo de deformaciones

Cuando hablamos de deformímetros extensométricos (DE) nos referimos a aquellos sensores cuyo comportamiento obedece a las deformaciones que se presentan sobre la superficie a la cual se encuentran adheridos y así poder determinar los esfuerzos en dicha superficie.

Los DE son instrumentos que por su tamaño reducido pueden ser considerados como puntuales o discretos. En la figura 2.1 se puede observar la composición básica de un sensor de este tipo.

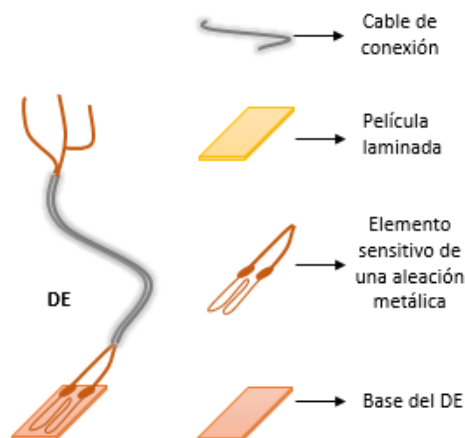


Figura 2.1 Elementos que componen un DE

El principio de funcionamiento de esta clase de deformímetros se basa en el uso de un elemento sensitivo de aleación metálica (Figura 2.1) que se elongará o contraerá según sea el esfuerzo aplicado ante una fuerza externa sobre la superficie instrumentada. Cuando hay una contracción o elongación sobre la superficie, en el elemento sensitivo metálico se presenta un cambio en su resistencia eléctrica, el cual está relacionado con la deformación de dicha superficie. (Kyowa, 2005)

Podemos definir el comportamiento de un DE con la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Donde:

R Resistencia eléctrica original del deformímetro (ohm)

ΔR Cambio en la resistencia (ohm)

K Constante proporcional (llamada factor de conversión)

ε Deformación

El valor de K variara según el tipo de metal que se use. Para los DE usados en este trabajo la aleación del elemento que dará la resistencia será el cobre el cual tiene un factor de conversión de 2. (Kyowa, 2005)

Los cambios de resistencia al ser infinitesimalmente pequeños son medidos con un amplificador de deformaciones por medio del uso de un circuito eléctrico denominado Puentes de Wheatstone.

Puente Wheatstone

El puente de Wheatstone se define como un circuito eléctrico que permite la amplificación de los cambios de resistencia en el elemento sensitivo de un deformímetro y así poder tomar registro de ellos.

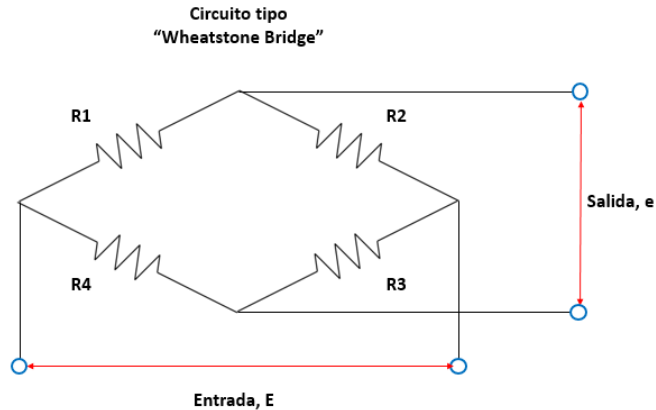


Figura 2.2 Configuración de un circuito tipo "Puente de Wheatstone"

Como se observa en la figura 2.2 se realiza el arreglo de un circuito en el cual el estado inicial será denominado estado de balance, cuando se pierde ese balance es entonces cuando tenemos un cambio en la resistencia del elemento.

Conexión de un cuarto de puente

En la figura 2.2 se aprecia que un puente de Wheatstone está conformado por cuatro resistencias, por lo que podemos realizar la sustitución de una resistencia por un DE como se muestra en la figura 2.3. A este tipo de arreglo se le conoce como conexión de $\frac{1}{4}$ de puente.

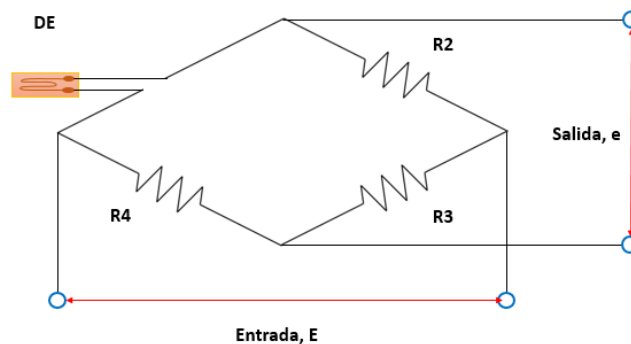


Figura 2.3 Configuración de una conexión de un solo DE

En la figura 2.3 se puede apreciar el sentido de flujo eléctrico, así como la entrada y la salida de este. En el estado de operación, el voltaje de una conexión de un cuarto de puente se determina como a continuación se muestra:

$$e = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot E \quad (2.2)$$

Donde:

R : Resistencia original del DE (ohm)

ΔR : Cambio en la resistencia (ohm)

E : Voltaje de entrada

e : Voltaje de salida

Y tomando en cuenta lo establecido en la ecuación 2.1 la ecuación 2.2 puede ser escrita de la siguiente manera:

$$e = \frac{1}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \cdot E \quad (2.3)$$

Donde:

K Constante proporcional (factor de conversión)

Entonces de la ecuación 2.3 al medir el voltaje de salida y conocer los demás términos podremos determinar la deformación ε en la superficie instrumentada.

Uso de sensores de deformación (BDI) para el cálculo de deformaciones

El principio de funcionamiento de estos sensores de deformación, conocidos por sus siglas en inglés como BDI (Bridge Diagnostics Inc.), también trabajan con el principio de operación del puente de Wheatstone. En este caso el puente de Wheatstone arroja una salida mayor de voltaje que la de un DE tradicional, ya que los BDI trabajan con una conexión de puente completo.



Figura 2.4 Sensor de deformación (BDI, 2010)

En comparación con los DE convencionales los sensores BDI (figura 2.4) ofrecen la ventaja de evitar el largo proceso de instalación que más adelante será descrito, limitándolo a la instalación de dos bases que irán adheridas al elemento del cual se desea conocer sus deformaciones.

Como se puede ver en la figura 2.5 el sensor al abarcar una mayor longitud y proporciona un "promedio" de deformaciones. En el caso del concreto reforzado se pueden presentar grietas y ser consideradas por el sensor sin repercutir en su funcionamiento.

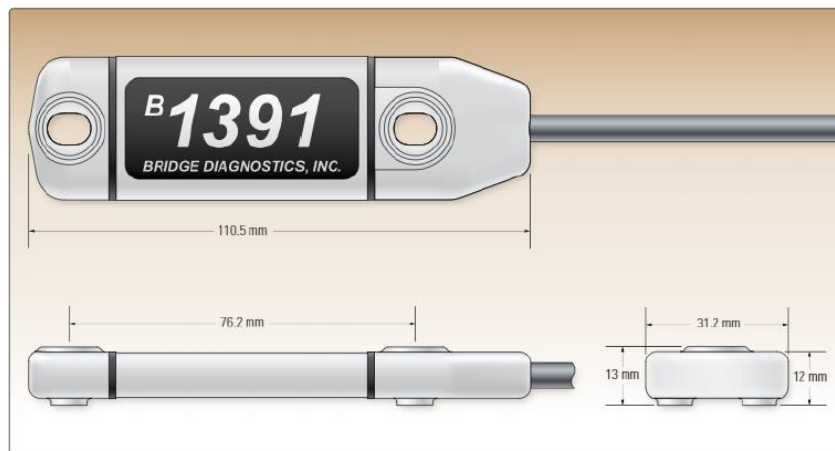


Figura 2.5 Dimensiones de sensores de deformación (BDI, 2010)

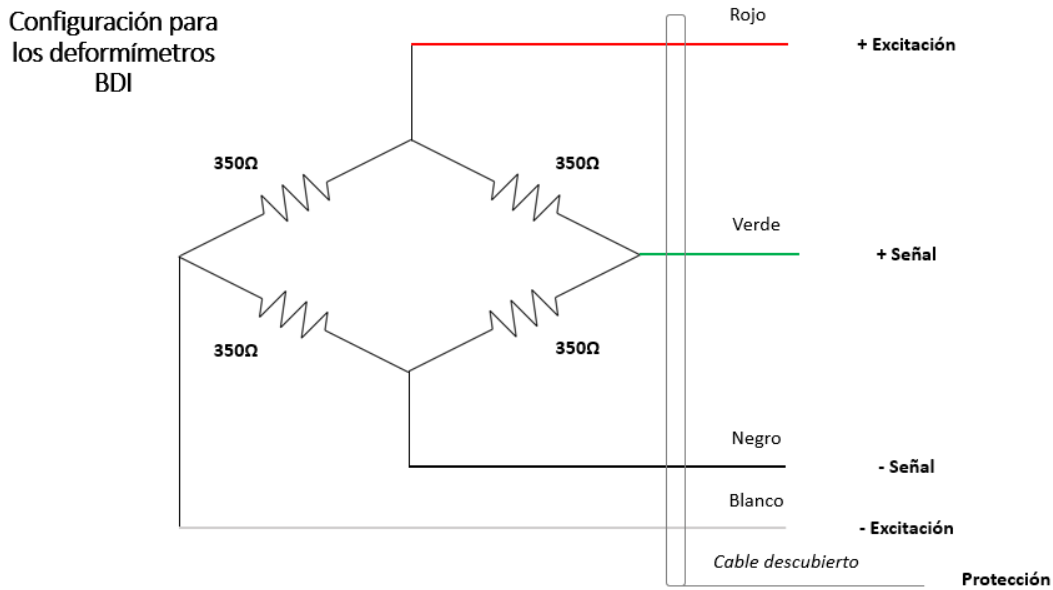


Figura 2.6 Secuencia de conexión para los sensores de deformación

El puente para este tipo de sensor, se compone de cuatro brazos (figura 2.6) en cada uno se encuentra un DE de $350\ \Omega$. Esta configuración nos provee aproximadamente de 3 a 3.5 veces más el valor de salida en comparación de los DE convencionales. (BDI, 2010)

La información a la salida estará dada por la siguiente ecuación:

$$Salida = V_{dif} = [(+Señal) - (-Señal)] \quad (2.4)$$

Si los valores a la salida son positivos se entiende que el elemento se encuentra sometido a tensión y en caso contrario de los valores negativos el elemento estará a compresión.

2.1.1 Clasificación de los sensores en base a su circuito eléctrico

Las estructuras de los circuitos eléctricos se pueden clasificar según la cantidad de deformímetros extensométricos usados.

Sistema de salida usando un deformímetro

En la mayoría de los casos se usará el sistema de salida de un solo deformímetro. Teniendo en cuenta las ecuaciones 2.2 y 2.3 podemos determinar la salida cuando solo tenemos un deformímetro en el circuito y para los distintos tipos de conexiones que se presentan a continuación.

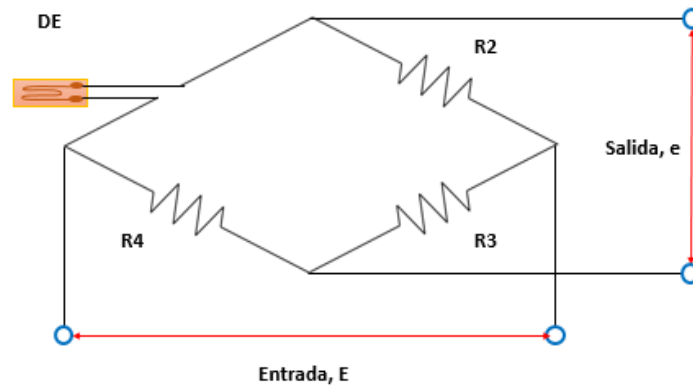


Figura 2.7 Sistema de conexión de un deformímetro

Para la figura 2.7 el voltaje de salida estará determinado por la ecuación 2.3.

$$e = \frac{1}{4} \cdot K \cdot \varepsilon_1 \cdot E \quad (2.3)$$

Sistema de salida de 2 deformímetros

Si hacemos una conexión en el sistema de 2 deformímetros tenemos 2 formas distintas de realizar la conexión, las cuales se muestran en la figura 2.8 y en la figura 2.9.

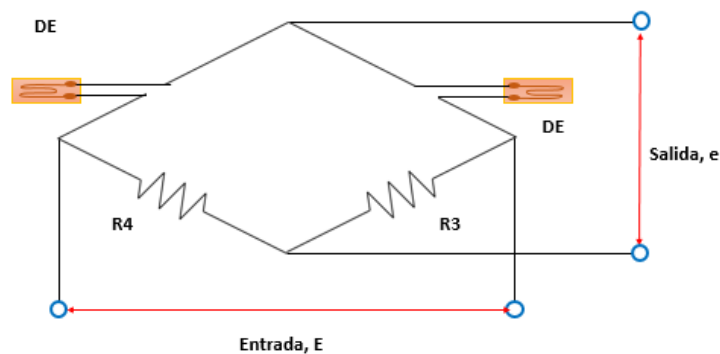


Figura 2.8 Sistema de salida de 2 deformímetros (tipo 01)

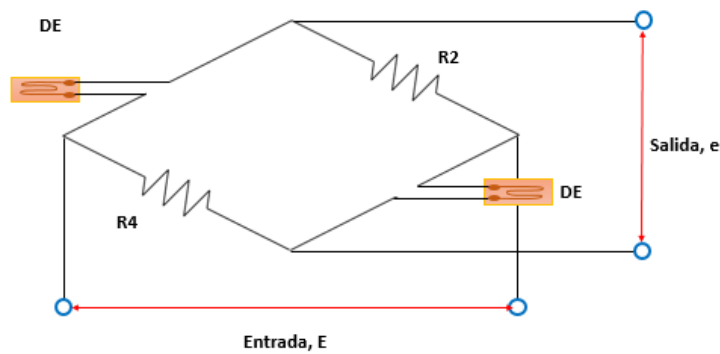


Figura 2.9 Sistema de dos deformímetros (tipo 02)

Para la figura 2.8 el voltaje de salida estará determinado por la ecuación 2.5.

$$e = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \cdot E \quad (2.5)$$

Que también puede ser escrita como:

$$e = \frac{1}{4} \cdot K \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot E \quad (2.6)$$

Para la figura 2.9 el voltaje de salida estará determinado por la ecuación 2.7.

$$e = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \cdot E \quad (2.7)$$

Que también puede ser escrita como:

$$e = \frac{1}{4} \cdot K \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot E \quad (2.8)$$

En este caso se debe tener en cuenta que tipo de conexión se ha realizado para aplicar el caso que sea correspondiente.

Sistema de salida de 4 deformímetros

El sistema de salida de 4 deformímetros cuya configuración presenta un deformímetro conectado en cada uno de los cuatro lados del puente del sistema (figura 2.10) es el principio de operación habitual de los sensores de deformación BDI y que es conocida como conexión de puente completo.

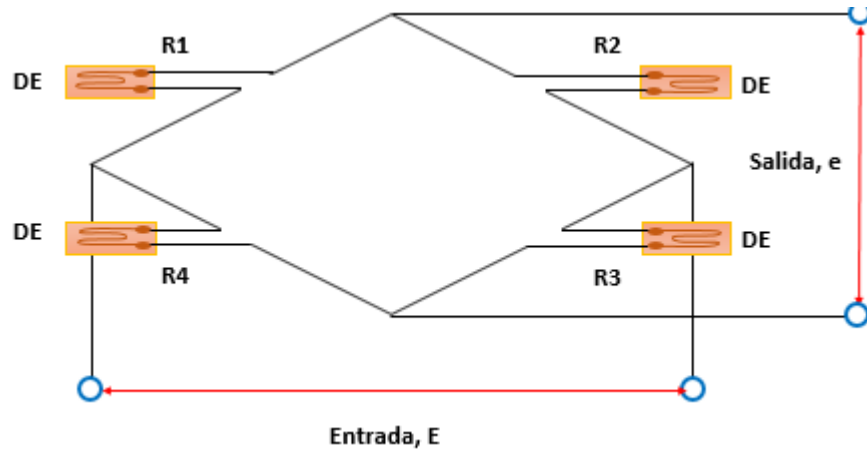


Figura 2.10 Sistema de salida de 4 deformímetros

Cuando se presenta un cambio en la resistencia de los cuatro DE, la resistencia cambia en $R_1 + \Delta R_1$, $R_2 + \Delta R_2$, $R_3 + \Delta R_3$ y $R_4 + \Delta R_4$, el voltaje de salida estará dado por:

$$e = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot E \quad (2.9)$$

Cuando los cuatro lados tienen un DE del mismo tipo y misma constante proporcional, entonces podemos escribir la ecuación 2.9 como:

$$e = \frac{1}{4} \cdot K(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.10)$$

2.2 Principio de funcionamiento de los deformímetros de cuerda vibrante

El principio del sensor de cuerda vibrante (figura 2.11) para medir deformaciones se basa en el uso de un cable de acero tensado entre dos

bloques de montaje (también referidos como bases) que estarán fijados en la superficie en estudio. (Geokon, 2017)



Figura 2.11 Sensor de cuerda vibrante (Geokon, 2015)

Al presentarse una deformación sobre la superficie se provoca que los bloques de montaje se muevan entre sí y con esto alterando la tensión en el cable de acero. La tensión en el cable se mide dando un tirón al cable y midiendo su frecuencia resonante de vibración.

La fijación es altamente recomendada mediante el uso de soldadura para garantizar una correcta adherencia del deformímetro de cuerda vibrante, otra alternativa es mediante el uso de pegamentos epóxicos sobre la superficie de estudio. En ambos casos se deberá realizar una limpieza en el área de estudio.

La frecuencia resonante de vibración es medida con el uso de una bobina magnética colocada junto al cable.

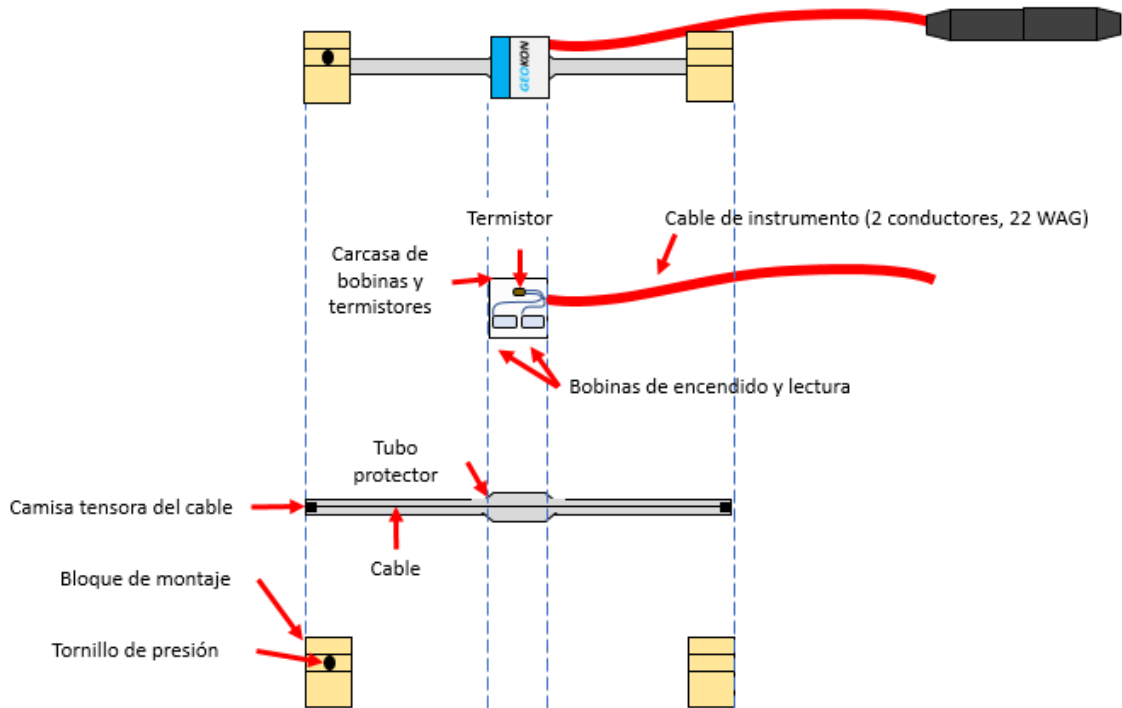


Figura 2.12 Elementos básicos que componen el sensor de cuerda vibrante

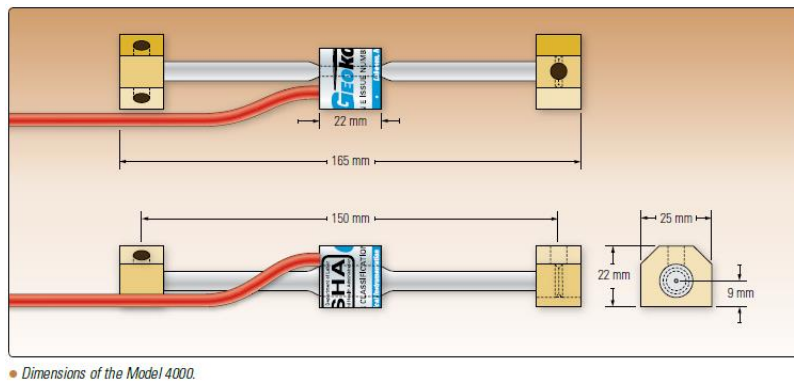


Figura 2.13 Dimensiones del sensor de cuerda vibrante (Geokon, 2015)

El deformímetro de cuerda vibrante al ser un instrumento de medición eléctrico requiere de una fuente de alimentación para poder excitar el cable de acero y comenzar con la lectura. Adicionalmente el sensor de cuerda vibrante abarca una longitud de 15 cm como se puede ver en la figura 2.13 y sobre esta longitud se reportará un valor promedio de deformaciones.

Teoría del funcionamiento de una cuerda vibrante

Un sensor de cuerda vibrante que se encuentra fijado a la superficie de un cuerpo deformante se deformara de igual manera. La deformación altera la tensión de la cuerda y de igual manera su frecuencia natural de vibración (también conocida como resonancia). La relación que se tiene entre frecuencia (periodo) y deformación (esfuerzo) se describe a continuación: (Geokon, 2019).

1- La frecuencia fundamental (frecuencia resonante) de vibración de una cuerda vibrante está dada por la siguiente ecuación.

$$f = \frac{1}{2 \cdot L_w} \cdot \sqrt{\frac{F}{m}} \quad (2.11)$$

Donde

L_w es la longitud de la cuerda en pulgadas

F es la tensión de la cuerda en libras

m es la masa de la cuerda por longitud unitaria (libras, $\text{seg}^2/\text{pul}^2$)

2- Se debe tener en cuenta

$$m = \frac{W}{L_w \cdot g} \quad (2.12)$$

Donde

W es el peso de la cuerda (libras)

g es la aceleración de la gravedad ($386 \text{ pulgadas}/\text{segundos}^2$)

3- Y calculando el peso

$$W = \rho \cdot a \cdot L_w \quad (2.13)$$

ρ es la densidad de la cuerda ($0.283 \text{ libras}/\text{pulgada}^3$)

a es la sección transversal del cable (pulgadas^2)

4- Al sustituir las ecuaciones 2.12 y 2.13 en la ecuación 2.11 tenemos:

$$f = \frac{1}{2L_w} \sqrt{\frac{F \cdot g}{\rho \cdot a}} \quad (2.14)$$

Donde

F es la tensión en el cable

5- La tensión puede ser expresada en términos de esfuerzo:

$$F = \varepsilon_w \cdot E \cdot a \quad (2.15)$$

Donde:

ε_w es la deformación del cable (pulgadas/pulgadas)

E es el módulo de Young del cable (30×10^6 psi)

6- Combinando las ecuaciones 2.14 y 2.15 se obtiene:

$$f = \frac{1}{2L_w} \sqrt{\frac{\varepsilon_w \cdot E \cdot g}{\rho}} \quad (2.16)$$

7- Sustituyendo los valores dados para E , g y ρ se tiene:

$$f = \frac{1010142}{L_w} \cdot \sqrt{\varepsilon_w} \quad (2.17)$$

8- Si tenemos el periodo de vibración, T multiplicado por el factor 10^6 .

$$T = \frac{10^6}{f} \quad (2.18)$$

9- La combinación de las ecuaciones 2.17 y 2.18 da como resultado

$$\varepsilon_w = \frac{97.75 \cdot L_w^2}{T^2} \quad (2.19)$$

10- Ahora la ecuación 2.19 desde ahora se expresará en términos de la deformación en la superficie del cuerpo al que esta fijo el deformímetro. Debido a que la deformación del cuerpo deberá ser equivalente a la deformación de la cuerda:

$$\varepsilon_w \cdot L_w = \varepsilon \cdot L_g \quad (2.20)$$

Donde:

ε es la deformación en el cuerpo

L_g es la longitud del deformímetro (en pulgadas)

11- La combinación de las ecuaciones 2.19 y 2.20 da como resultado:

$$\varepsilon = \frac{97.75}{T^2} \cdot \frac{L_w^3}{L_g} \quad (2.21)$$

Donde: (para el deformímetro usado en este trabajo):

L_w es 6.25 pulgadas

L_g es 5.875 pulgadas

12- Por lo tanto, llegamos a la expresión siguiente

$$\varepsilon = 4.062 \times 10^3 \left(\frac{1}{T^2} \right) \quad (2.22)$$

En forma alternativa (en microdeformaciones):

$$\varepsilon = 4.062 \times 10^3 f^2 \quad (2.23)$$

Donde

f es la frecuencia en Hz

Una vez que se ha entendido el principio de funcionamiento de los sensores eléctricos se debe conocer otros aspectos tales como: dimensiones, procedimiento de instalación, procedimiento de operación e interpretación de datos, los cuales serán descritos más adelante.

Capítulo 3

Sensores de deformación de fibra óptica

En el presente capítulo, se hace una introducción a los sensores cuyo principio de operación se basa en el uso de fibra óptica, se mencionan sus componentes, los arreglos en los que pueden ser instalados, así como su principio de operación.

3.1 Fundamentos de los sensores de fibra óptica (SFO)

La fibra óptica (figura 3.1) puede ser descrita como un hilo de cristal con un diámetro aproximado de nueve micrómetros, es decir casi la centésima parte de un milímetro, usualmente está protegido mecánicamente con un revestimiento de un polímero de 125 micrómetros de diámetro (o en condiciones extremas, con una protección metálica) y algunas veces introducido en un cable diseñado para poder ser manipulado, dicho cable puede tener un diámetro aproximado desde los 250 micrómetros hasta los 900 micrómetros (casi un milímetro). (*Branko Glišić, Daniele Inaudi, 2007*)

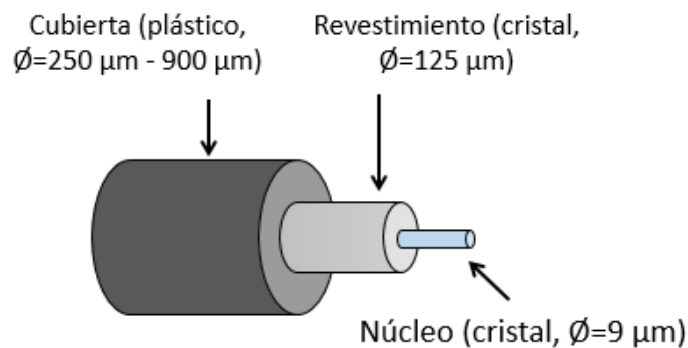


Figura 3.1 Sección transversal de un cable de fibra óptica

El cristal, como material es inerte y muy resistente a una gran variedad de productos químicos y a altas temperaturas, es un material ideal para aplicaciones en ambientes agresivos, incluso como las que se pueden

presentar en pozos de petroleros, de gas, o cuando se encuentra embebido (figura 3.2) en una gran estructura de concreto como la cortina de una presa. (Branko Glišić, Daniele Inaudi, 2007)



Figura 3.2 SFO embebido en concreto (Notas SHMII-7 Short Course, 2015)

Los avances que trajo consigo el área de telecomunicaciones dotaron de ventajas a los sensores de fibra óptica (SOF) en cuestión de calidad de información, pero también en cuanto a costos de adquisición de equipo. Por lo cual, en sus inicios, los (SFO) parecían invadir por completo el mercado del monitoreo, pues aparentaban resolver muchos problemas. Sin embargo, se ha encontrado que sus ventajas pueden variar en función del tipo de monitoreo, el entorno, extensión y otros aspectos que cambian para cada caso. (Branko Glišić, Daniele Inaudi, 2007)

Inicialmente se piensa que la adquisición de un SFO resulta muy costosa, pero cuando se trata de un monitoreo en donde la confiabilidad sea una prioridad y la falla de este podría traer consecuencias catastróficas, el costo se justifica. Por otra parte, los SFO tienen un mejor desempeño, en comparación a sensores eléctricos, en ambientes agresivos que pueden presentarse en la industria de los combustibles fósiles (figura 3.3) y en ambientes no tan agresivos como es el caso del monitoreo de un edificio. (Branko Glišić, Daniele Inaudi, 2007)



Figura 3.3 Ducto de gas expuesto a cambios bruscos de temperatura por radiación solar, lluvias, nevadas y alguna posible flama

Las ventajas más grandes que nos ofrece la fibra óptica se deben a sus propiedades fisicoquímicas. Por ejemplo, el cristal en ciertas condiciones puede conducir la luz mediante reflexión interna total y lo que permite hacer un monitoreo de estructuras remotas de o gran magnitud, (esto debido a la capacidad de la fibra óptica para transferir información con pocas pérdidas de la intensidad de señal a lo largo de unas decenas de kilómetros y por la topología única que nos ofrece esta tecnología para conectar sensores en serie) como ductos de gas, algún puente o muchos puentes a lo largo de una carretera. Otras ventajas son que la fibra óptica provee de inmunidad ante interferencias electromagnéticas y a la corrosión.

Un sensor de fibra óptica distribuido (SFOD) es un cable de fibra óptica que tiene la propiedad de poder medir deformaciones a lo largo de toda su longitud, algunos a cada centímetro y otros incluso a cada milímetro, sin embargo, en el presente trabajo se utilizaron SFO que se clasifican como sensores quasi-distribuidos (figura 3.4) pues con ellos obtenemos una lectura promedio de la deformación que ocurre en una longitud de 305 (mm).



Figura 3.4 Sensor de fibra óptica quasi-distribuido

El funcionamiento del SFO usado en este trabajo se basa en el principio de funcionamiento de las fibras de Bragg. Este sensor contiene en su interior dos rejillas de Bragg protegidas de tal manera que ofrece una compensación para cuando haya una variación importante en la temperatura ambiente donde se llevará a cabo el estudio.

Este tipo de sensor puede ser usado individualmente o en un arreglo en serie. Cabe mencionar que la conexión entre sensores se puede realizar de manera sencilla y se detallará más adelante.

El sensor al ser instalado sobre dos placas de acero puede ser soldado, o pegado a la superficie con el uso de pegamentos epóxicos.

Principio de funcionamiento de los Sensores de Fibra Óptica

El principio físico en el que se basa el funcionamiento de cualquier clase de SFO es el fenómeno de reflexión interna total (figura 3.5). Este fenómeno se produce cuando un rayo de luz intenta atravesar un medio con un índice de refracción n_2 a otro medio con un índice de refracción menor denominado n_1 (Ecuación 3.1). El rayo de luz no es capaz de atravesar ambos medios, reflejándose completamente. Dicho fenómeno se produce solamente para ángulos de incidencia superiores a cierto valor crítico. (Rossi B., 1966)

$$n_1 > n_2 \quad (3.1)$$

Donde:

n es el índice de refracción

Y si:

$$n = \frac{V}{V_i} \quad (3.2)$$

Donde:

V Es la velocidad de la luz en el vacío

V_i Es la velocidad de la luz en algún medio

Entonces para que sea posible confinar la luz:

$$\frac{V}{V_1} > \frac{V}{V_2} \quad (3.3)$$

Por lo cual:

$$V_2 > V_1 \quad (3.4)$$

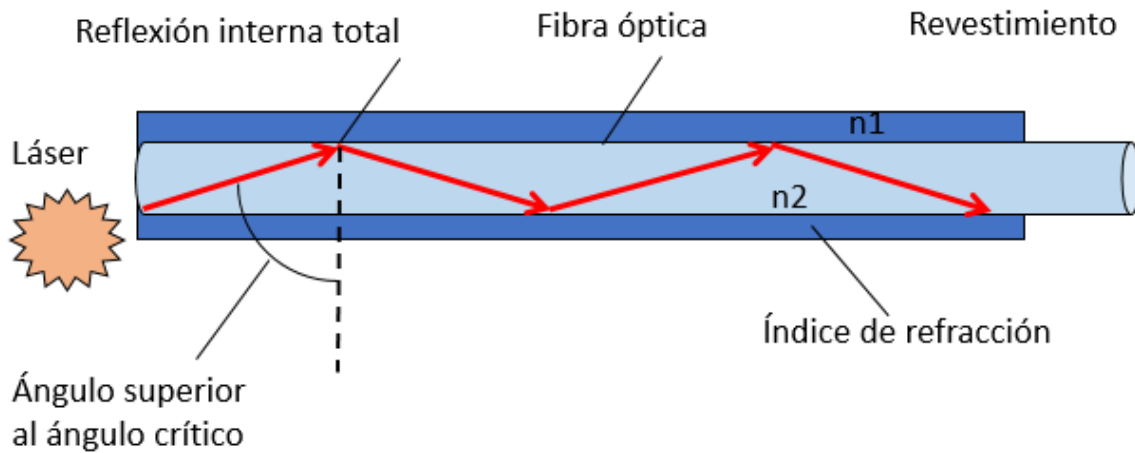


Figura 3.5 Refracción interna total

3.1.1 Clasificación de los SFO en función de sus rangos de medición (discretos, quasi-distribuidos y distribuidos)

SFO discretos

Los SFO discretos se caracterizan por medir la deformación en un punto en específico.

Si bien el uso de SFO discretos puede proporcionar información puntal de algún elemento estructural se tiene la desventaja de que se pueda ignorar el comportamiento en otras secciones y con eso, perder información relevante para entender de mejor manera el comportamiento de un sistema estructural.

Un ejemplo puede ser, el instrumentar una viga de concreto reforzado (figura 3.6), en donde podemos perder una gran cantidad de información si algún sensor se colocó en algún punto en donde se presentó alguna grieta. (*Branko Glišić, Daniele Inaudi, 2007*)

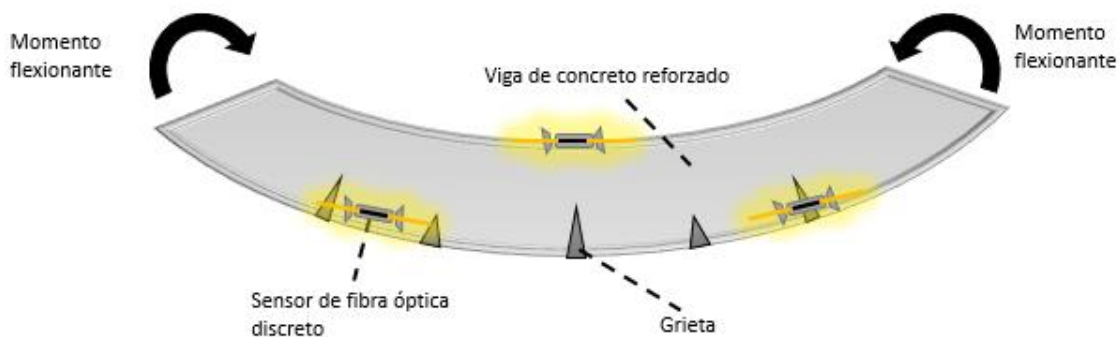


Figura 3.6 Uso de sensores discretos en una viga de concreto reforzado

SFO quasi-distribuidos

Dada la ventaja que nos ofrecen los sensores de fibra óptica para ser conectados en serie (figura 3.7), podemos formar un arreglo de sensores que es llamado redes de Bragg. Esto da origen a una de las técnicas de SFO quasi-distribuidos, pues al conectar un gran número de sensores y colocarlos en una línea de interés, nos acercamos al concepto de monitoreo distribuido. Aunque la cantidad de sensores que puede ser

colocados en serie es considerable (128 sensores por canal de un total de cuatro canales para el equipo utilizado en esta tesis), podría resultar muy costoso intentar realizar una medición continua con esta técnica debido a la gran cantidad de instrumentos requeridos y a la gran cantidad de información generada.

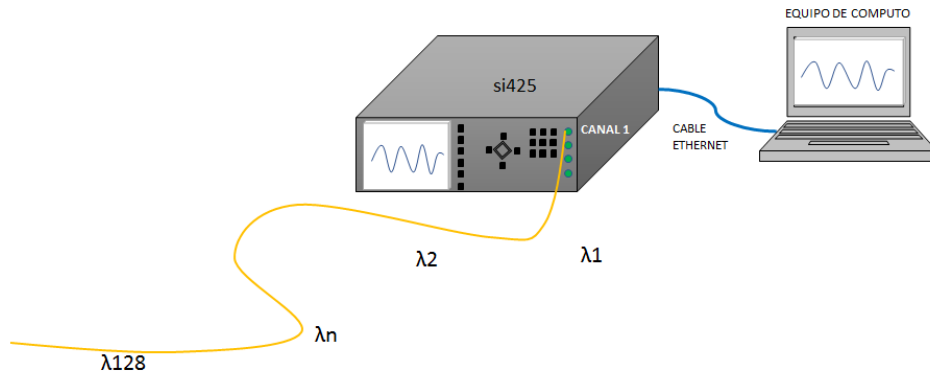


Figura 3.7 Conexión de SFO en serie

La otra técnica de SFO quasi-distribuido consiste en colocar sensores con una longitud de medición amplia, 10 [cm], 15 [cm], 30 [cm], entre otros. En este caso, se considera la deformación promedio que se mide entre los dos apoyos del sensor.



Figura 3.8 SFO quasi-distribuido de 11 cm (Micronoptics.com)

SFO distribuidos (SFOD)

Los SFOD (figura 3.9), son elementos que proveen información continua a lo largo de una fibra óptica, se pueden medir decenas de metros simultáneamente y con una resolución micrométrica.

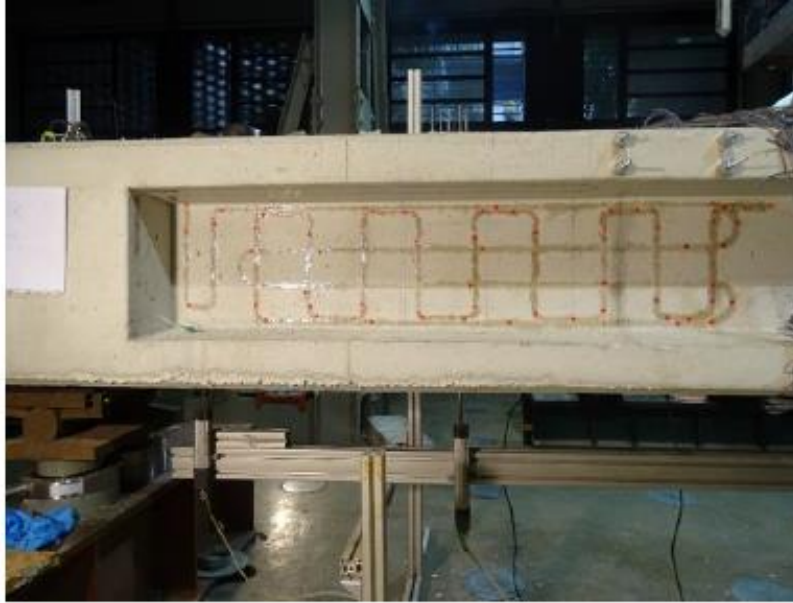


Figura 3.9 SFO distribuida colocada en una trabe de concreto reforzado, (Gerardo R. 2017)

A diferencia de los SFO convencionales, los SFOD ofrecen la posibilidad de monitorear variaciones en una dirección sobre una estructura de manera realmente distribuida. Pero también nos da la posibilidad para realizar capturas de datos fuera de lo común, pues, en vez de escoger puntos representativos de una estructura, pueden cubrirse por completo superficies o volúmenes, habilitando de esta forma el monitoreo global, lo cual puede resultar bastante interesante. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la gran cantidad de información que puede ser generada y la capacidad de procesamiento que se necesita. *(Branko Glišić, Daniele Inaudi, 2007)*

Solo requiere una conexión simple (conexión en serie) para comunicar la información recopilada, pues la fibra óptica actúa como sensor y como medio para transferir la información, a diferencia de los sistemas convencionales que requieren de conexiones múltiples. En el monitoreo con sensores eléctricos, se suele utilizar un cable por sensor, lo cual para casos en donde se requiera una gran cantidad de sensores resultará una desventaja.

3.2 El principio de difracción de las rejillas de Bragg en los sensores de fibra óptica

El método de rejillas de Bragg (figura 3.10) está basado en alteraciones periódicas en el índice de refracción del núcleo de la fibra la cual puede ser provocada exponiendo la fibra a luz ultravioleta.

Las rejillas producidas tienen longitudes del orden de 10 (mm) y cuando un haz de luz (puede ser láser) se inyecta en la fibra óptica que contiene una rejilla, entonces la longitud de onda correspondiente a la rejilla será reflejada mientras que las longitudes de onda restantes pasarán desapercibidas a través de la rejilla sin modificar el comportamiento de esta. Por lo cual, si las propiedades de la rejilla son función de una deformación (acortamiento o elongación) y de la temperatura, se hace posible monitorear este parámetro, al asociar a una deformación la variación de la longitud de onda de la luz que es reflejada. Por otra parte, ya que la rejilla permite el paso de múltiples longitudes de onda, es posible conectar en serie una gran cantidad de SFO cada uno con una rejilla con una longitud de onda conocida.

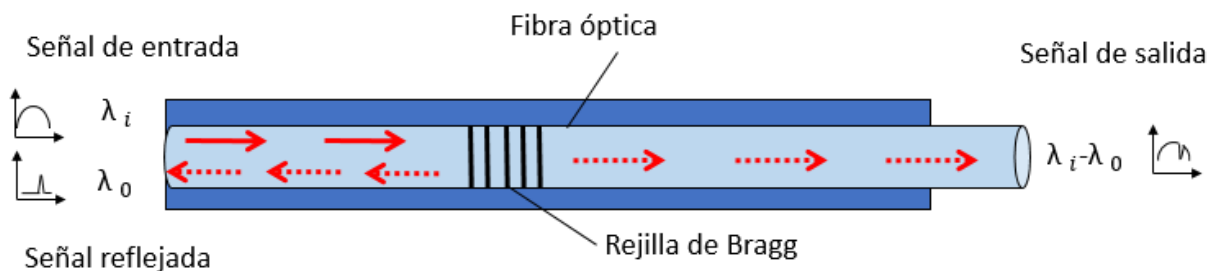


Figura 3.10 Funcionamiento de una rejilla de Bragg

El principio de Bragg estará dado en función de las variables que se muestran a continuación, en donde nos es de interés conocer la longitud de onda del sistema.

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{ef} \cdot \Lambda \quad (3.5)$$

Donde:

λ_B : Longitud de onda de la fibra de Bragg

Λ : Periodo de la microestructura

n_{ef} : Índice de refracción del núcleo

Dentro de las propiedades de las rejillas de Bragg, es que las podemos utilizar como sensor, pues el periodo de la microestructura se ve alterado cuando la fibra se estira o se acorta.

La conexión en serie puede aplicarse en experimentos de laboratorio o en el monitoreo de una estructura en construcción o que ya se encuentra en servicio. Los sensores pueden ser colocados sobre la superficie de elementos mecánicos o embebidos en el concreto. Se debe tener especial cuidado cuando sea el caso de sensores embebidos, pues los SFO con rejillas de Bragg pueden sufrir alteraciones en su índice de refracción cuando se les somete a una presión transversal, es por ello que se debe poner atención en la protección del sensor y así evitar malas interpretaciones.

Dada la magnitud de la mayoría de las obras civiles, una conexión en serie ahorra a grandes rasgos un cable por cada sensor que se coloque, lo cual simplifica bastante el proceso de instalación, evitando errores de conexión. Por ejemplo, un edificio a base de marcos puede ser instrumentado completamente si se coloca una red de sensores a lo largo de todos los elementos estructurales. (*Branko Glišić, Daniele Inaudi, 2007*)

Capítulo 4

Ventajas y desventajas de los instrumentos de medición eléctricos y ópticos

Al existir una variedad de instrumentos de medición para la determinación de las deformaciones unitarias es importante conocer las características, cualidades y limitantes de los sensores para explotar al máximo su desempeño y capacidades dependiendo de las diversas condiciones que puedan presentarse en algún caso de estudio.

En el presente capítulo se resaltarán las ventajas y desventajas de los:

- a) Deformímetros extensométricos (DE)
- b) Sensores de deformación (BDI)
- c) Sensores de cuerda vibrante (SCV)
- d) Sensores de fibra óptica (SFO)

Que son los sensores con los que se contaron para las pruebas realizadas en la presente tesis

4.1 Ventajas y desventajas de los instrumentos de medición eléctricos

Deformímetros extensométricos (DE)

Ventajas

- La información de deformación obtenida corresponde a la superficie donde se colocó (figura 4.1)
- Son convenientes para mediciones puntuales
- Pueden colocarse en zonas reducidas donde sensores de mayor tamaño serían difíciles de colocar.

Desventajas

- El proceso de instalación se debe realizar con una serie de cuidados que hacen un proceso largo

- Son elementos de medición muy delicados que pueden ser dañados con facilidad
- Una vez instalados, no se pueden reubicar por lo que no tienen flexibilidad ante una incorrecta instalación
- Si aparece una grieta en la ubicación puede perderse la operatividad del sensor (figura 4.2)

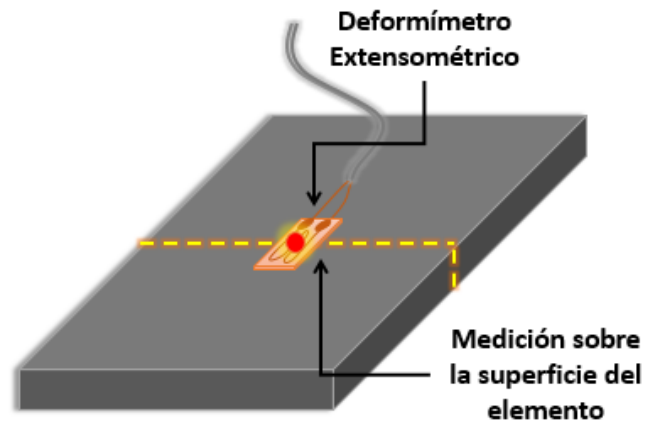


Figura 4.1 DE en el plano de la superficie de estudio en donde las lecturas reportadas corresponderán al comportamiento real de la superficie

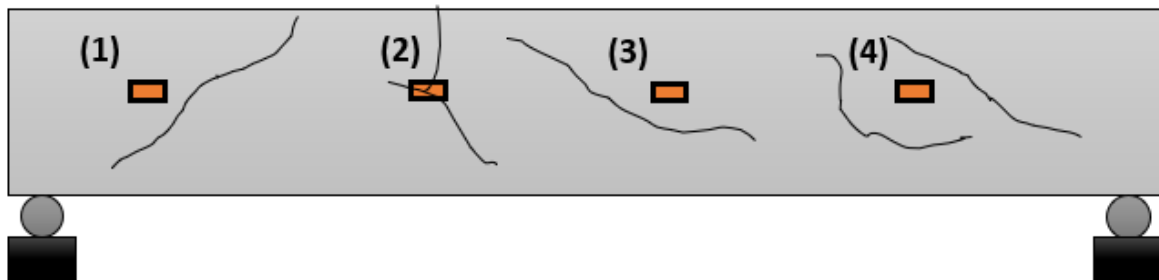


Figura 4.2 Ejemplificación de la aparición de grietas sobre el sensor (2) con riesgo de perder la operación

Sensores de deformaciones (BDI)

Ventajas

- Los sensores son resistentes a golpes y/o rayaduras
- El proceso de instalación es sencillo, rápido y repetible
- Su salida de voltaje es 3 veces mayor que la de los deformímetros extensométricos convencionales. Esto permite que se eviten las interferencias por ruido.
- Pueden ser recalibrados para volver a tener resultados confiables
- Son resistentes al agua hasta profundidades de 6 metros
- Debido al espacio libre entre los apoyos (110.5 mm) en elementos de concreto se pueden obtener lecturas promedio en zonas donde se han presentado grietas
- Existen placas base para soldar el deformímetro a una superficie metálica (Figura 4.3).
- Tienen un tiempo de vida de hasta 10 años
- Si se quiere abarcar una longitud mayor de monitoreo, existen extensiones para poder hacerlo hasta una longitud de 61 cm y en incrementos de 7.6 centímetros (Figura 4.5)

Desventajas

- Si no son adheridos correctamente pueden desprenderse durante la prueba y con esto reportar datos erróneos



Figura 4.3 Placa base para fijar el BDI de forma segura (bditest.com)



Figura 4.4 Extensión para el sensor BDI (bditest.com)

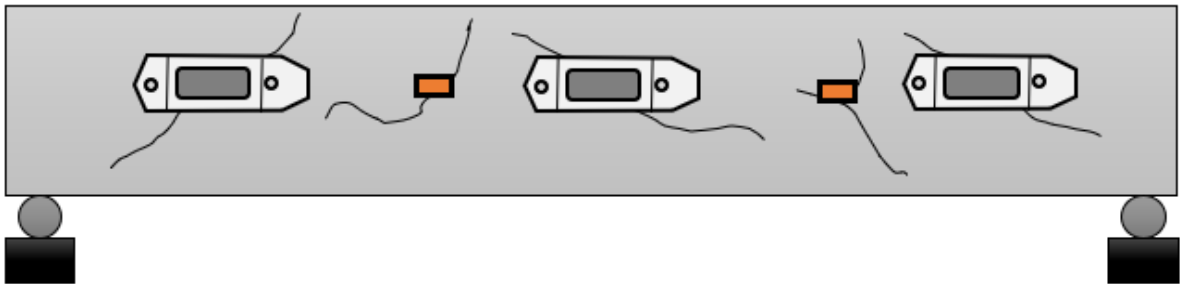


Figura 4.5 Aparición de grietas sobre los sensores, en donde los BDI tienen mayor probabilidad de evitar ser afectados por las grietas

Sensores de cuerda vibrante (SCV)

Ventajas

- Proporciona información de la temperatura actual en la que se desarrolla la prueba.
- El fabricante provee diferentes complementos de instalación sobre superficies de concreto (figura 4.7 y 4.8) o acero para adaptarnos a cualquier medición en las que se utilicen.

Desventajas

- Se requiere un voltaje de alimentación de 12 V para cada sensor, por lo cual es necesario contar con una fuente de alimentación, además se debe cuidar que no se supere dicho voltaje pues se dañará el convertidor analógico.

- La cantidad de conexiones necesarias es mayor que la de los otros sensores usados en este trabajo (figura 4.6).
- Se debe tener cuidado en que la bobina este bien fija al sensor, de lo contrario las lecturas serán erróneas.
- El deformímetro de cuerda vibrante modelo 4000 no es adecuado para medir las deformaciones dinámicas o que cambian repentinamente.

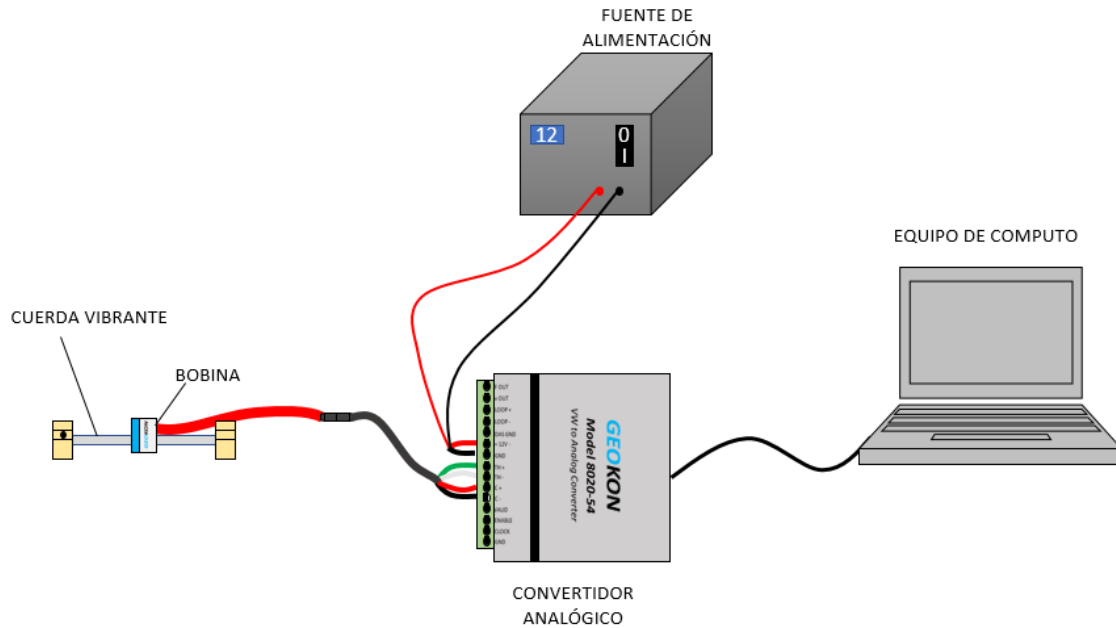


Figura 4.6 Esquema de la conexión necesaria para un sensor de cuerda vibrante



Figura 4.7 Bloques de instalación para concreto (Geokon, 2010)

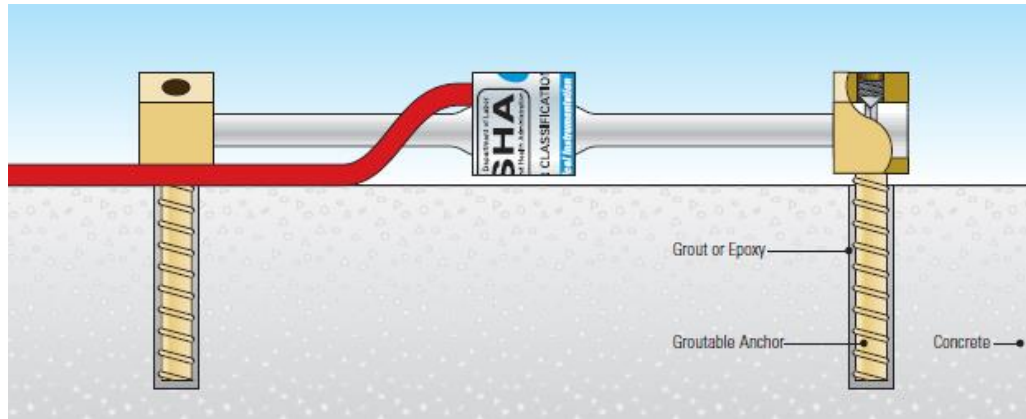


Figura 4.8 Sensor de cuerda vibrante instalado sobre concreto (Geokon, 2010)

4.2 Ventajas y desventajas de los instrumentos de medición ópticos

Sensores de Fibra Óptica (SFO)

Ventajas del sensor de fibra óptica os360

- Posee un sensor de compensación por temperatura
- Instalación sencilla, rápida y fácilmente repetible
- Cada sensor cuenta con un cable que permite la interconexión entre más sensores del mismo tipo (hasta 128 sensores por canal)
- La interfaz de la captura de datos puede mostrar las lecturas en tiempo real.
- Los sensores tienen un tiempo de respuesta instantáneo, lo que permite el monitoreo de una prueba dinámica, además de poder capturar hasta 250 muestras por cada segundo.

Desventajas del sensor de fibra óptica os360

- No puede ser instalado en espacios reducidos dado su tamaño (30 centímetros de largo) tal como se ve en la figura 4.9.
- Los cables del sensor no permiten una curvatura excesiva pues el núcleo de cristal puede fracturarse (figura 4.10).
- Se debe conocer bien el rango de operación del sensor para evitar una saturación del sensor durante la prueba.
- El polvo en las conexiones puede causar una atenuación de la señal.

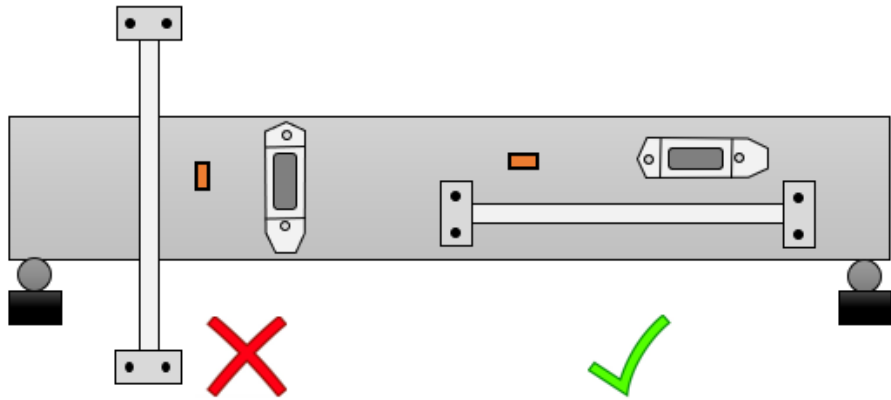


Figura 4.9 Ejemplo de limitación en la instalación debido a su tamaño

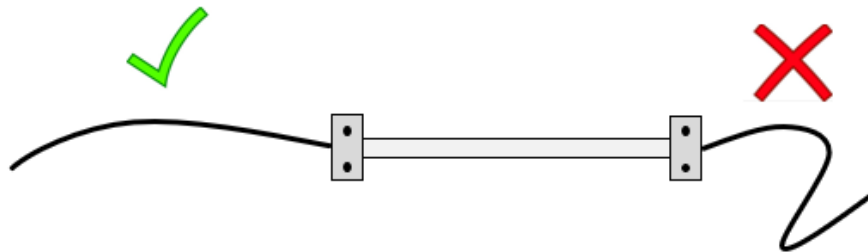


Figura 4.10 Cuidado de las curvaturas de los cables de fibra óptica

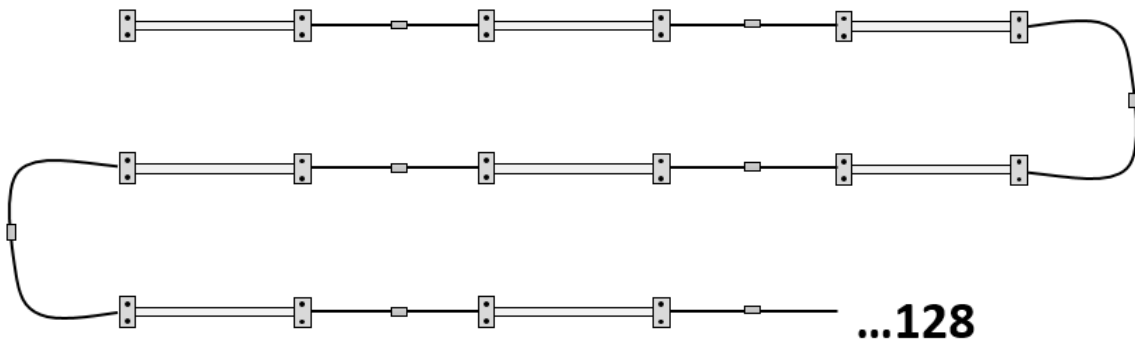


Figura 4.11 Conexión en serie de los SFO

Capítulo 5

Mediciones de la deformación unitaria en estudios experimentales de ingeniería estructural

En el presente capítulo se presenta la metodología para la instalación y operación de los sensores eléctricos (DE, BDI y SCV) y los sensores ópticos (SFO).

Una vez que se ha entendido el procedimiento de instalación y de adquisición de datos se describe el proceso de instrumentación en diversos casos de estudio, los cuales se presentan a continuación:

- a) El caso de dos barras metálicas en voladizo
- b) Prueba de un muro sujeto a carga lateral
- c) Pruebas experimentales en disipadores de energía

En donde se describen las particularidades para cada caso de estudio y finalmente se presentan conclusiones y comentarios para cada experimento.

5.1 Metodología para la instalación de sensores de deformación

Como se ha mencionado en el capítulo anterior los instrumentos de medición a usar serán los siguientes:

- a)** Deformímetros extensométricos (DE)
- b)** Deformímetros (BDI)
- c)** Sensor de Cuerda Vibrante (SCV)
- d)** Sensor de Fibra Óptica (SFO)

A continuación, se describe el proceso a seguir para la instalación de cada uno de estos sistemas de medición.

- a)** Deformímetros extensométricos (DE)

Instalación de los deformímetros extensométricos

Con el fin de obtener resultados confiables, es necesario realizar la colocación de los DE con el mayor cuidado posible. En el caso de estudio de esta tesis estos sensores se colocaron sobre la superficie metálica de dos barras metálicas, este procedimiento puede ser válido para instalar un deformímetro extensométrico en superficies metálicas, de tal forma garantizaremos compatibilidad de deformaciones entre la barra metálica y el sensor.

Materiales para la instalación de deformímetros extensométricos

A continuación, se enlistarán los materiales necesarios para la instalación los deformímetros extensométricos, los cuales se muestran en la figura 5.1.1 (a) y (b).

- Dos sensores extensométricos por cada barra: Dado que las barras metálicas serán instrumentadas tanto en las fibras a tensión y en las de compresión.
- Pegamento hecho a base de cianocrilato: En nuestro caso utilizamos un adhesivo de la marca LOCTITE 495 el cual está hecho especialmente para componentes electrónicos.
- Lija calibre 400
- Gasas estériles
- Acetona
- Cinta adhesiva
- Resina Lack B (figura 5.1.1 b)



Figura 5.1.1 Material necesario para colocación de los DE

Metodología de instalación de los deformímetros extensométricos

1) Como primer paso se retiro cualquier objeto que se encontraba adherido a la superficie en donde se colocaro el sensor, esto puede hacerse con ayuda de una espátula o una navaja para cutter como se ve en la figura 5.1.2.

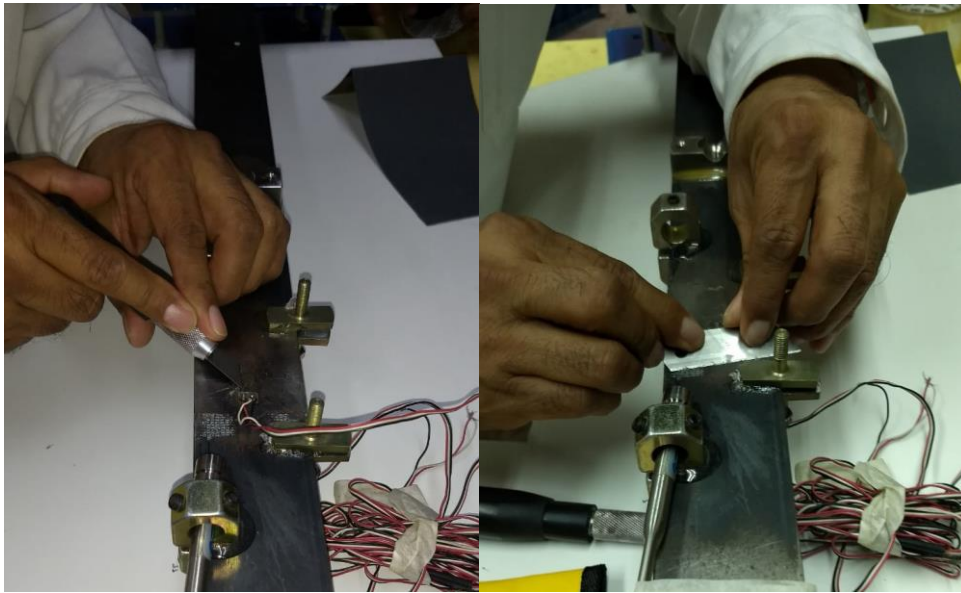


Figura 5.1.2 Limpieza de impurezas

2) Posteriormente, con ayuda de la lija calibre 400 se realizaron movimientos circulares sobre la superficie metálica como se puede ver en la figura 5.1.3. Este proceso ayudó a retirar el óxido, escoria presente y adhesivos que previamente se encontraban sobre la superficie. Esto se hizo hasta que la superficie quedara limpia de impurezas aparentes y con una apariencia similar a la que se muestra en la figura 5.1.4.



Figura 5.1.3 Lijado de la superficie



Figura 5.1.4 Apariencia deseada de la superficie

3) Como siguiente paso con la gasa humedecida de acetona se retiro el material desprendido por la lija, este proceso se repitió hasta el punto en el que al realizar la limpieza la gasa no presentara suciedad después de frotarla con la superficie metálica (figura 5.1.5).



Figura 5.1.5 Limpieza de la superficie con una gasa

4) Con ayuda de una escuadra y una navaja se trazaron líneas que sirvieron como guía para colocar el deformímetro extensométrico (estas líneas deben indicar el punto exacto a monitorear y la orientación del sensor) (figura 5.1.6). Al terminar este procedimiento se repitio la técnica de limpieza con una gasa y acetona para retirar el material desprendido al trazar las líneas de guía y la suciedad por haber manipulado la barra metálica.



Figura 5.1.6 Trazo de líneas guía

5) Una vez que se ha limpiado la superficie se procedio a la técnica para realizar la colocación del deformímetro. Primero se coloco el deformímetro sobre la mesa (identificando la parte superior e inferior del DE) para despues cortar un trozo de cinta adhesiva de aproximadamente cinco centímetros, el cual sirvio para la manipulación del sensor al momento de la aplicación del pegamento epoxico. Se procedio a colocar la cinta adhesiva sobre el DE, como si se buscara adherir el sensor a la mesa de trabajo (figura 5.1.7).

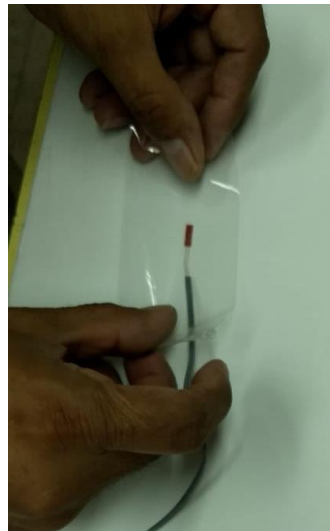
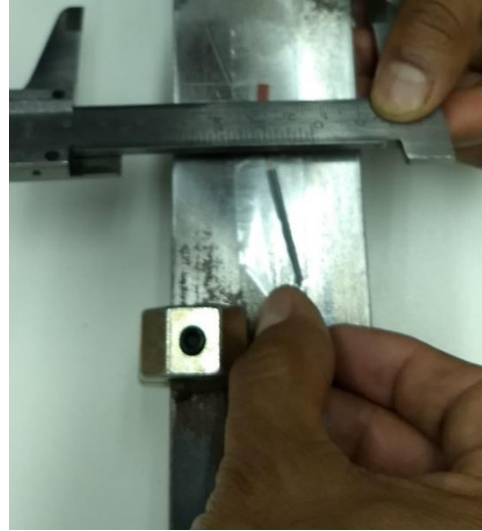


Figura 5.1.7 Colocación de la cinta adhesiva sobre el DE

6) Con precaución se retiró el trozo de cinta adhesiva de la mesa. Una vez despegado el trozo de cinta se colocó sobre la superficie de instalación (figura 5.1.8) y con ayuda de la cinta se le dio la orientación correcta al DE previo a la aplicación del pegamento (figura 5.1.9).



*Figura 5.1.8
Colocación del DE
sobre la superficie*



*Figura 5.1.9 Alineación del DE sobre la
superficie con las líneas trazadas*

7) Al haber orientado el DE correctamente se procedió a pegar el extremo superior de la cinta adhesiva a la superficie metálica para poder manipularla de manera sencilla (figura 5.1.10) durante el momento de la aplicación del pegamento.

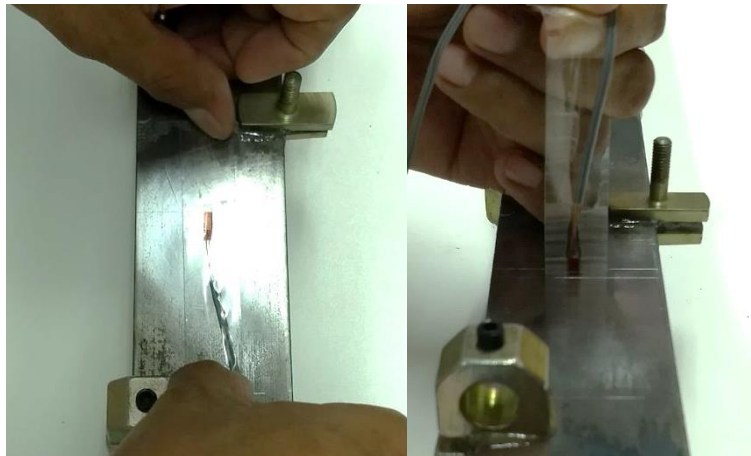


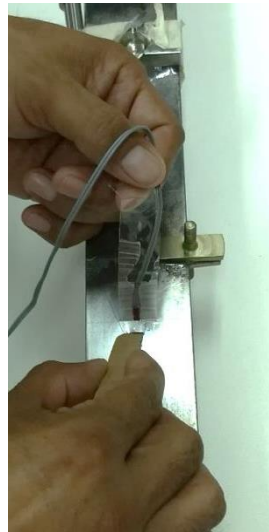
Figura 5.1.10 Colocación de la cinta previo a la aplicación del pegamento

8) Para la aplicación del pegamento que unirá el DE con la superficie metálica, se aplicó una gota de pegamento *LOCTITE 495* en el punto en donde será colocado el DE (figura 5.1.11) y con ayuda de un trozo de

cartón procedimos a distribuir el pegamento sobre el área que ocupará el DE (figura 5.1.12).



*Figura 5.1.11
Aplicación del
pegamento*



*Figura 5.1.12
Distribución del
pegamento*

9) Posterior a la aplicación y distribución del pegamento se volvió a colocar la cinta adhesiva con el DE sobre la superficie metálica y se procedió a aplicar presión sobre la cinta en un solo sentido como se ve en la figura 5.1.13.

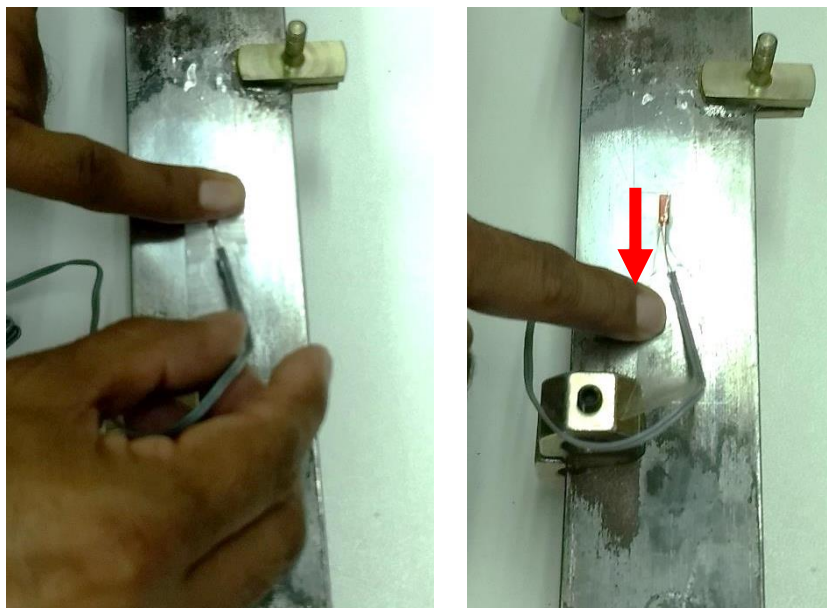


Figura 5.1.13 Técnica para asegurar la fijación del DE con la superficie metálica

10) El paso siguiente fue la remoción de los residuos del excedente del pegamento que salió por debajo de la cinta adhesiva, para esto se hizo uso de una gasa estéril como se muestra en la figura 5.1.14.



Figura 5.1.14 Limpieza del excedente de pegamento

11) Al finalizar la limpieza del excedente de pegamento se procedió a esperar a que el pegamento surtiera efecto según lo establecido por el fabricante. Posterior al tiempo de espera se procedió a retirar la cinta adhesiva (figura 5.1.15) con precaución para evitar algún daño en el DE.

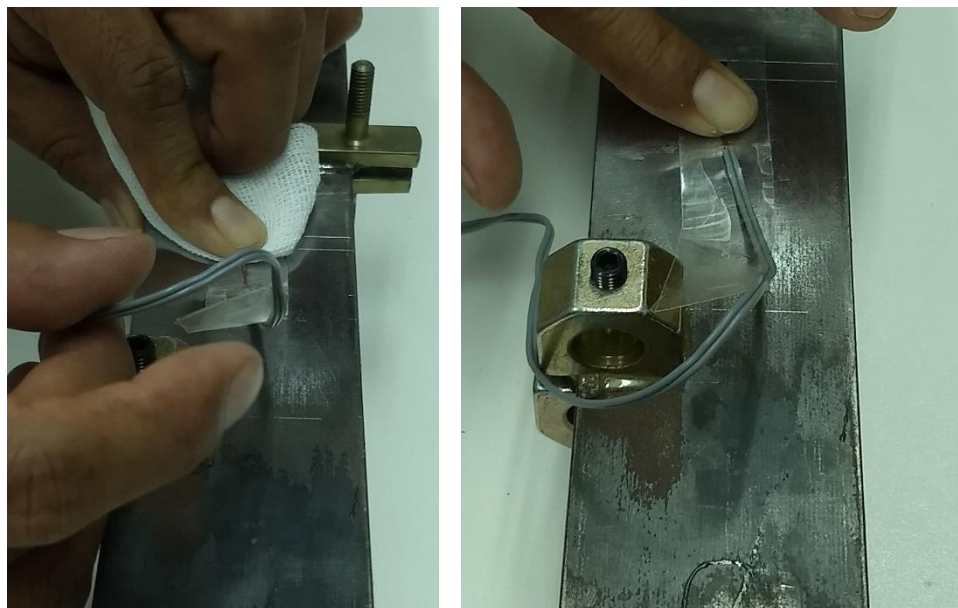


Figura 5.1.15 Remoción de la cinta adhesiva

12) Después de haber removido la cinta adhesiva en el cableado de nuestro DE se formó un arco (figura 5.1.16) con el fin de protegerlo ante alguna acción súbita que resulte en el desgarro y/o desprendimiento del DE o en el daño de alguno de sus componentes.

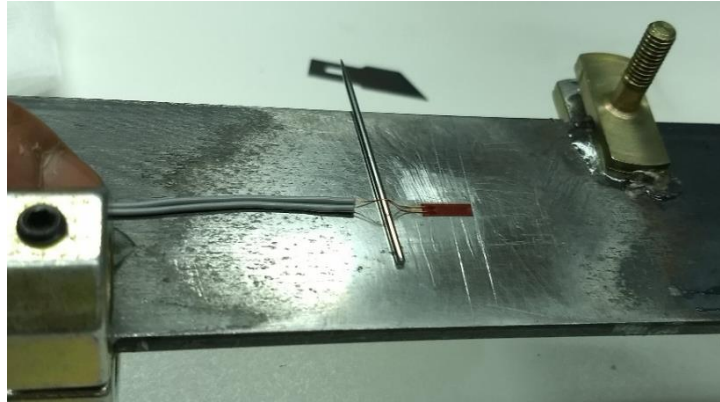


Figura 5.1.16 Arco realizado para evitar un desgarre en el DE

13) Una vez realizado el arco se procedió a fijar el cable del DE con ayuda de cinta para ductos (figura 5.1.17) debido a sus propiedades de resistencia y fijación.

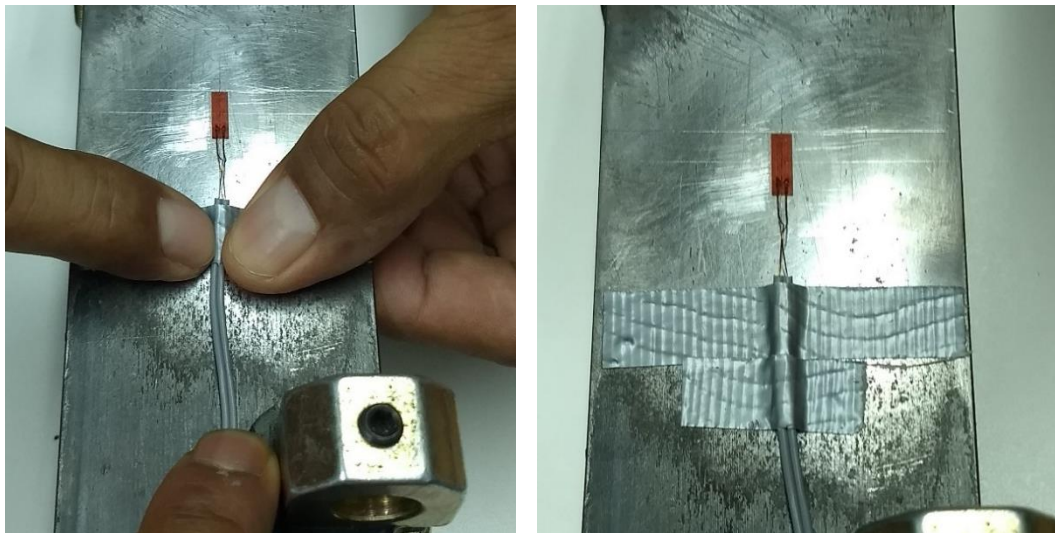


Figura 5.1.17 Fijación del DE

14) Como nuestro DE es un sistema que funciona con electricidad se corroboro que la instalación haya sido realizada correctamente y no se presentara flujo de corriente entre el DE y la barra metálica con ayuda de

un multímetro (figura 5.1.18). Adicionalmente se revisó las resistencias de los DE.



Figura 5.1.18 Revisión de los parámetros de corriente del DE

15) Hasta este punto nuestro DE ya se encontraba listo para proceder al procedimiento de conexión para llevar a cabo la toma de mediciones, pero con el objetivo de incrementar la protección en nuestro DE se le aplicó un par de capas de resina especial para componentes electrónicos (Lack B) como se puede ver en la figura 5.1.19. Posteriormente se dejó secar por el tiempo establecido por el fabricante.



Figura 5.1.19 Aplicación de la resina protectora

b) Sensores es de deformación (BDI)

Instalación de los sensores de deformación

En el caso de estudio de esta tesis estos sensores dada su facilidad de operación y de captura de datos fueron instalados sobre la mayor parte de las pruebas contenidas en este trabajo. Los sensores de deformación fueron usados en las pruebas de:

- Una barra metálica en voladizo (Barra Tipo 02)
- Un muro sujeto a carga lateral
- Disipadores de energía (Disipadores Tipo 02, 03 y 04)

Las recomendaciones dadas por el fabricante indican que de ser posible se recomienda realizar la soldadura de las bases sobre la superficie de estudio (para elementos metálicos), pero en los casos de estudio de esta tesis dado que se instalaron los sensores en superficies metálicas y de mampostería se optó por el uso de pegamento tipo epóxico para la adherencia de los BDI.

El procedimiento de instalación fue similar en todas las pruebas, donde la barra metálica fue el procedimiento que pudo ser realizado con mayor tiempo de preparación por lo cual se usara como ejemplo para ejemplificar la instalación de este tipo de sensores.

En comparación con la instalación de los DE, la instalación de los sensorres de deformación (BDI) es menos laboriosa, pero se debe seguir el principio de lograr una adherencia adecuada para tener un comportamiento que nos reporte las variaciones de deformación sobre la superficie en estudio.

Materiales para la instalación de sensores de deformación

- sensores de deformación (BDI)
- 2 bases de metal por cada BDI para fijar el sensor a la superficie
- 2 tuercas de acero por cada BDI
- Pegamento tipo epóxico de secado rápido (5 minutos)
- Lija calibre 400

Metodología de instalación de los sensores de deformación

1) El primer paso fue limpiar las superficies sobre las que se colocaran las bases de los deformímetros lijando la superficie para remover las impurezas y posteriormente realizar la limpieza con la ayuda de acetona.

2) Posteriormente se procedió a realizar la colocación de cada BDI sobre las bases de acero y fueron fijadas con las tuercas de acero como se puede ver en la figura 5.1.20.

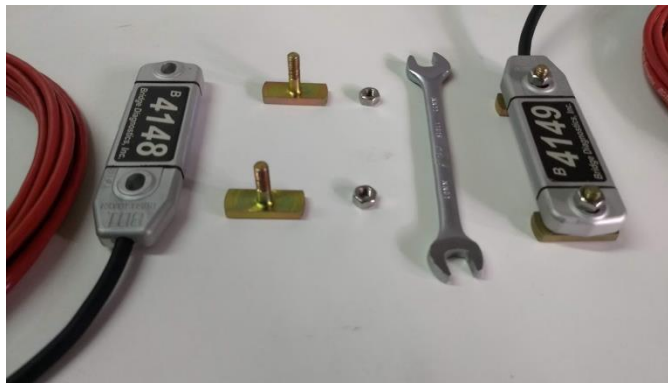


Figura 5.1.20 Armado de los sensores BDI

3) El paso siguiente fue limpiar las bases de los deformímetros con acetona para garantizar una unión uniforme de entre los BDI y las superficies sobre las que se obtuvieron las deformaciones unitarias (figura 5.1.21).



Figura 5.1.21 Limpieza de las bases de los BDI

4) Al haber limpiado las bases de los BDI se procedió a la preparación del pegamento epóxico usado para realizar la unión entre los elementos

(figura 5.1.22), para lo cual se siguieron las instrucciones indicadas por el fabricante hasta obtener una mezcla homogénea.



Figura 5.1.22 Procedimiento de mezclado

5) Se distribuyó la mezcla sobre el área de las bases del BDI (figura 5.1.23) para garantizar la adherencia entre la superficie y las bases del sensor.



Figura 5.1.23 Distribución del pegamento sobre las bases

6) Una vez que la mezcla fue distribuida sobre las bases se procedió a colocar el BDI sobre la superficie de estudio y se aplicó presión durante 5 minutos (tiempo recomendado por el fabricante) hasta que el BDI tuviera una buena adherencia (figura 5.1.24).



Figura 5.1.24 En la parte superior se puede apreciar las bases pegadas en la superficie (sin el BDI) y en la cara contraria se puede ver el BDI completamente instalado.

c) Sensor de Cuerda Vibrante

Instalación de los sensores de cuerda vibrante

La instalación del sensor de cuerda vibrante sigue la metodología aplicada hasta el momento en cuanto a limpieza y materiales de adherencia.

De igual manera el tiempo de instalación en comparación de los DE fue más rápido y similar al tiempo de instalación de los BDI y los SFO.

Este sensor fue usado únicamente en los experimentos de las barras metálicas en voladizo, por lo que el procedimiento de instalación fue en una superficie metálica.

Materiales para la instalación de sensores de cuerda vibrante

- Sensores de cuerda vibrante (SCV)
- 2 bases de metal por cada SCV para fijar el sensor a la superficie
- 1 Llave Allen
- Pegamento tipo epóxico de secado rápido (5 minutos)
- Lija calibre 400

Metodología de instalación de los sensores de deformación

1) Como primer paso se realizó la limpieza de la superficie sobre la que se instaló el SCV. Con ayuda de la lija se removieron las imperfecciones de la superficie (figura 5.1.25), posterior a eso, con una gasa con acetona se removió la suciedad (figura 5.1.26).



Figura 5.1.25 Remoción de las asperezas sobre la superficie



Figura 5.1.26 Limpieza con acetona

2) Posteriormente se procedió a realizar el armado de cada SCV (únicamente las bases y la cuerda) con ayuda de la llave Allen se fijaron las bases a la cuerda como se ve en la figura 5.1.27.

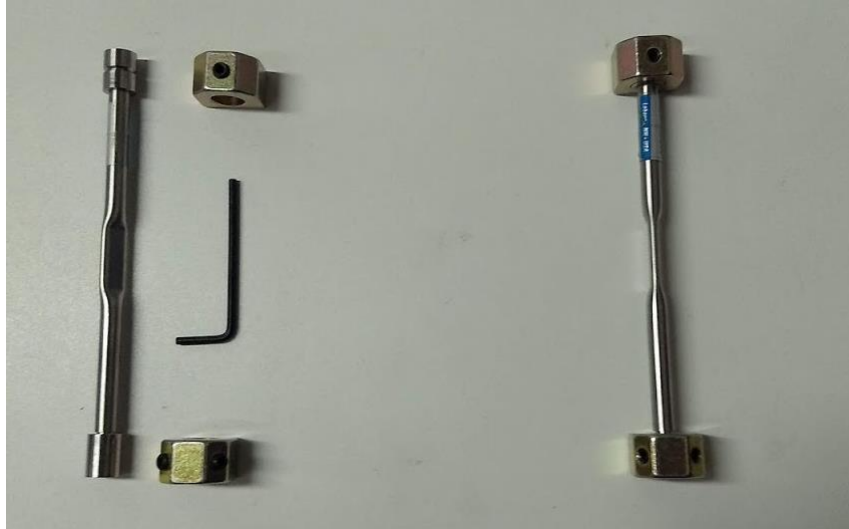


Figura 5.1.27 Armado de los SCV

3) El paso siguiente fue limpiar las bases del SCV con acetona para garantizar una unión uniforme de entre el SCV y la superficie sobre las que se obtuvieron las deformaciones unitarias (figura 5.1.28).



Figura 5.1.28 Limpieza de las bases del SCV

4) Al haber limpiado las bases de los SCV se procedió a la preparación del pegamento epóxico usado para realizar la unión entre los elementos, para lo cual se siguieron las instrucciones indicadas por el fabricante hasta obtener una mezcla homogénea (en este punto se tuvo especial cuidado en la instalación para evitar el contacto entre sensores tal como se ve en la figura 5.1.29).



Figura 5.1.29 Arreglo de los sensores para el caso de estudio sobre la barra metálica tipo 02

5) Se distribuyó la mezcla sobre el área de las bases del SCV (figura 5.1.30) para garantizar la adherencia entre la superficie y las bases del sensor.



Figura 5.1.30 Aplicación de la mezcla sobre la base de lo SCV

6) Una vez que la mezcla fue distribuida sobre las bases se procedió a colocar el SCV sobre la superficie de estudio y se aplicó presión durante 5 minutos (tiempo recomendado por el fabricante) hasta que el SCV tuviera una buena adherencia (figura 5.1.31).



Figura 5.1.31 Fijación de las bases del SCV

7) Para finalizar la instrumentación del SCV sobre la barra metálica, se procedió a colocar la bobina sobre la cuerda vibrante como se aprecia en la figura 5.1.32.



Figura 5.1.32 Bobina de la cuerda vibrante

d) Sensor de Fibra Óptica (SFO)

Instalación de los sensores de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica se caracterizan por ser los que ocuparon una mayor extensión sobre las superficies (30 centímetros). En el caso de estudio de esta tesis, los SFO fueron utilizados en la mayor parte de los experimentos. Los SFO fueron usados en las pruebas de:

- Una barra metálica en voladizo (Barra Tipo 02)
- Un muro sujeto a carga lateral
- Disipadores de energía (Disipadores Tipo 01, 02, 03 y 04)

Las recomendaciones dadas por el fabricante indican que de ser posible se recomienda realizar la soldadura de las bases sobre la superficie de estudio (para elementos metálicos), pero en los casos de estudio de esta

tesis dado que se instalaron los sensores en superficies metálicas y de mampostería se optó por el uso de pegamento tipo epóxico para la adherencia de los SFO.

El procedimiento de instalación fue similar en cada prueba, donde la barra metálica fue el procedimiento que pudo ser realizado con mayor tiempo de preparación por lo cual se usara como ejemplo para ejemplificar la instalación de este tipo de sensores.

Al igual que los BDI la instalación es sencilla y rápida, pero se debe seguir el principio de lograr una adherencia adecuada para tener un comportamiento que nos reporte las variaciones de deformación sobre la superficie en estudio.

Materiales para la instalación de sensores de fibra óptica

- Sensores de fibra óptica (SFO)
- 2 bases de metal por cada SFO para fijar el sensor a la superficie
- 4 tornillos de acero por cada SFO
- 1 llave Allen
- Pegamento tipo epóxico de secado rápido (5 minutos)
- Lija calibre 400

Metodología de instalación de los sensores de fibra óptica

1) Como primer paso se realizó la limpieza de la superficie sobre la que se instaló el SFO. Con ayuda de la lija se removieron las imperfecciones de la superficie, posteriormente con una gasa con acetona se removió la suciedad (figura 5.1.33).



Figura 5.1.33 Limpieza de la superficie con acetona

2) Posteriormente se procedió a realizar el armado de cada SFO con ayuda de la llave Allen se fijaron las bases del SFO como se ve en la figura 5.1.34. El SFO se compone por el sensor, 2 bases y 4 tornillos (2 para cada base).

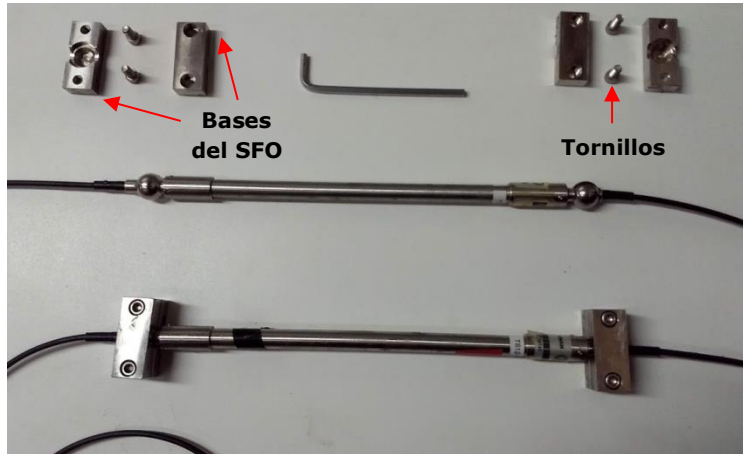


Figura 5.1.34 Sensor de fibra óptica listo para su instalación

3) El paso siguiente fue limpiar las bases de los SFO con acetona para garantizar una unión uniforme de entre los SFO y las superficies sobre las que se obtuvieron las deformaciones unitarias.

4) Al haber limpiado las bases de los SFO se procedió a la preparación del pegamento epóxico usado para realizar la unión entre los elementos (figura 5.1.35), para lo cual se siguieron las instrucciones indicadas por el fabricante hasta obtener una mezcla homogénea.



Figura 5.1.35 Preparación del pegamento

5) Se distribuyó la mezcla sobre el área de las bases del SFO (figura 5.1.36) para garantizar la adherencia entre la superficie y las bases del sensor.



Figura 5.1.36 Distribución del pegamento sobre una base del SFO

6) Una vez que la mezcla fue distribuida sobre las bases se procedió a colocar el SFO sobre la superficie de estudio y se aplicó presión durante 5 minutos (tiempo recomendado por el fabricante) hasta que el SFO tuviera una buena adherencia (figura 5.1.37).



Figura 5.1.37 Fijación de las bases del SFO

5.2 Procedimiento para la adquisición de datos

En el presente apartado se explicarán los diversos procedimientos para la adquisición de datos de cada sensor, se explicará acerca de los componentes y el orden en el que deberán ser conectados para proceder a la metodología de captura de datos mediante la ayuda de equipos adicionales y programas computacionales.

Para cada sensor se tiene un sistema de adquisición de datos de acuerdo con su principio de operación:

- 1) Con el Puente Vishay Modelo P3 se obtienen las lecturas de los deformímetros extensométricos y sensores de deformación (BDI).

-
- 2) Para la cuerda vibrante se usarán convertidores analógicos para transmitir la información al equipo de cómputo y con ayuda del programa "Hyperterminal" para la captura de datos.
 - 3) Para la fibra óptica se usará el sistema *si425* y el programa de computo correspondiente a los sensores de fibra óptica que, nos permite obtener la captura de datos.

A continuación, se presentan tres procedimientos para la adquisición de datos, los cuales se clasifican de la siguiente manera:

- a) Adquisición de datos de deformímetros extensométricos y los sensores de deformación
- b) Adquisición de datos para los sensores de cuerda vibrante
- c) Adquisición de datos para los sensores de fibra óptica

Adquisición de datos de deformímetros extensométricos y los sensores de deformación

Para los DE y los BDI se tiene el caso de que para la captura de datos se utilizó el Puente Vishay Modelo P3 (P3) el cual se presenta en la figura 5.2.1. Cada sensor deberá conectarse en un canal diferente del P3. El tipo de conexión y la configuración del P3 dependerán del principio de operación del sensor, siendo de un cuarto de puente para los DE (figura 5.2.2) y de puente completo para los BDI (figura 5.2.3).



Figura 5.2.1 Puente Vishay modelo P3 (P3)

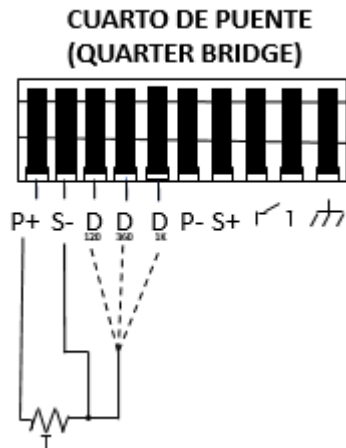


Figura 5.2.2 Diagrama de conexión de cuarto de puente para los DE

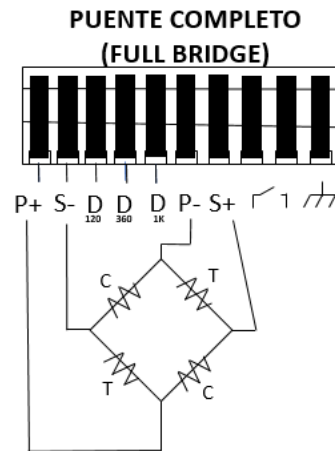


Figura 5.2.3 Diagrama de conexión de puente completo para los DBI

Conexiones de los deformímetros extensométricos y los sensores de deformación

1- Para los DE al trabajar con el principio de cuarto de puente se deben conectar los 3 cables de salida del DE al P3 como se muestra en la figura 5.2.4.

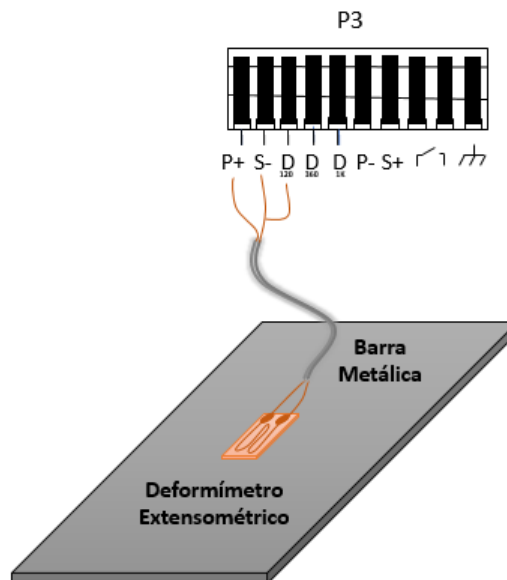


Figura 5.2.4 Conexión del DE con el Puente Vishay

2- El sensor de deformación BDI al ser un sistema que trabaja con el principio del Puente Wheatstone se conecta con el arreglo correspondiente a un puente completo (full bridge) como se puede ver en la figura 5.2.5 basándose en el patrón de colores mostrado.

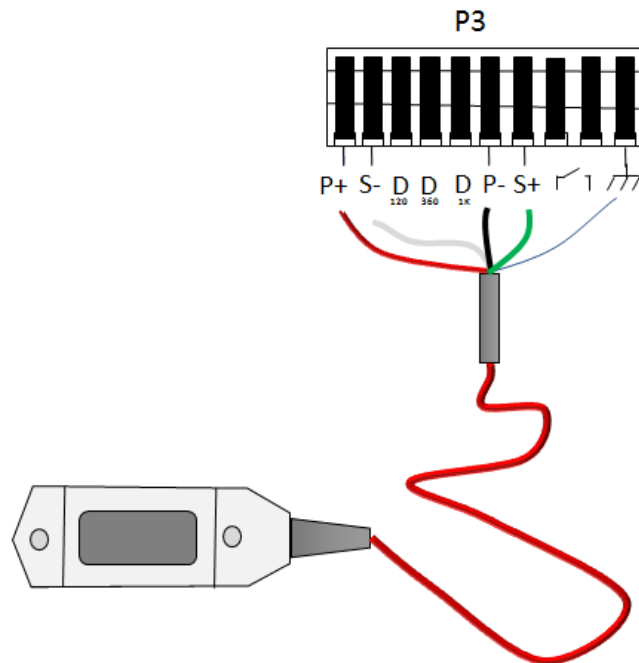


Figura 5.2.5 Conexión del DE con el Puente Vishay

Metodología de captura de los deformímetros extensométricos y los sensores de deformación

Como se mencionó con anterioridad, se hizo uso del sistema Vishay Modelo P3 (Strain Indicator and Recorder) el cual cumple la tarea de captura de datos de forma sencilla para los DE y los BDI.

En la figura 5.2.6 se puede apreciar el panel de operación del P3 así como su variedad de botones, los cuales servirán para llevar a cabo la configuración del sistema y la captura de datos.

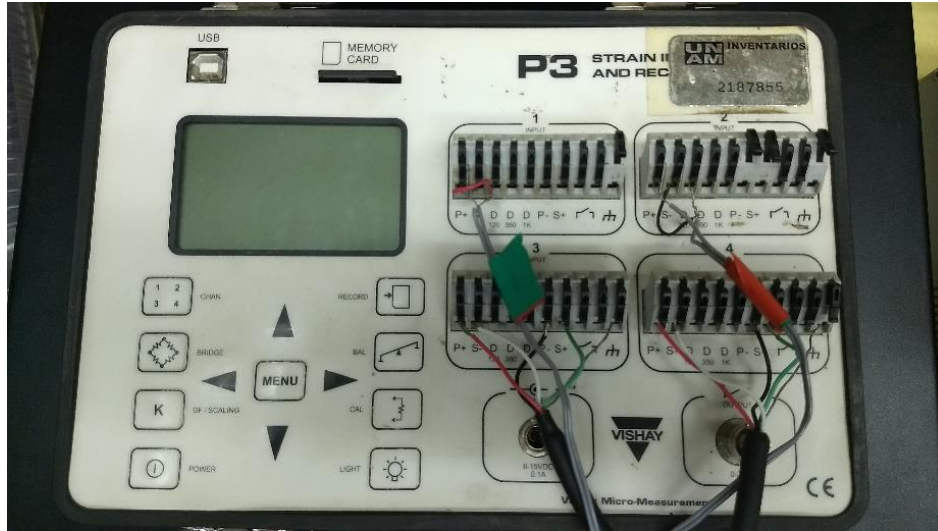


Figura 5.2.6 Panel del P3 y entrada para las conexiones de los sensores

1) El primer paso para la operación del P3 es presionar el botón "POWER" (figura 5.2.8 parte inferior izquierda) durante al menos 3 segundos para encender el P3. Una vez que se ha activado el P3 se presentara el mensaje de la figura 5.2.7.



Figura 5.2.7 Iniciación del P3

2) Para la captura de datos se deben tener activados los canales que sean requeridos, para ello se presiona el botón "MENU" y nos desplegara el menú principal del sistema (figura 5.40) y en el comando de "Select Channels" se puede modificar el estado de cada canal a "ACTIVE" (figura 5.2.8) seleccionando el canal y después se debe presionar ya sea el botón izquierdo o derecho para la activación del canal.



Figura 5.2.8 Menú principal del P3 y panel de operación



Figura 5.2.9 Selección de los canales a usar

3) Posteriormente se debe asignar el tipo de puente que le corresponde a cada instrumento de medición. Se presiona el botón "MENU" y una vez localizado el comando "Bridge Type" se selecciona, el tipo de puente estará establecido por el principio de funcionamiento de los sensores que se usarán.

Como ya se ha mencionado en la presente tesis se usaron deformímetros extensométricos los cuales al trabajar con un cuarto de puente se les asigna el tipo "Quarter" y sensores de deformación los cuales funcionan

con el principio de puente completo, por lo que se les asigna la configuración "FB 4 active".



Figura 5.2.10 Configuración de los tipos de puentes a usar

4) Otra configuración que debe realizarse es la asignación del tipo de escala o el factor de galga tal como se ve en la figura 5.2.11, el cual será proporcionado por el fabricante de los instrumentos usados.

Como se ha mencionado con anterioridad para los DE se usó un factor de 2 y las unidades reportadas estarán en $\mu\epsilon$ (micro deformaciones). En el caso de los BDI se tiene que la configuración de unidades se deberá establecer en mV/V lo cual fue establecido por las especificaciones técnicas del fabricante.



Figura 5.2.11 Configuración de los factores de galga y unidades de captura

5) El P3 adicionalmente cuenta la opción de almacenamiento de datos (figura 5.44) ya sea de forma automática o manual almacenando la información en una tarjeta de memoria. En el caso de realizar una prueba automática puede establecerse el tiempo de captura de datos de forma automática siendo el menor rango de captura de 1 segundo.

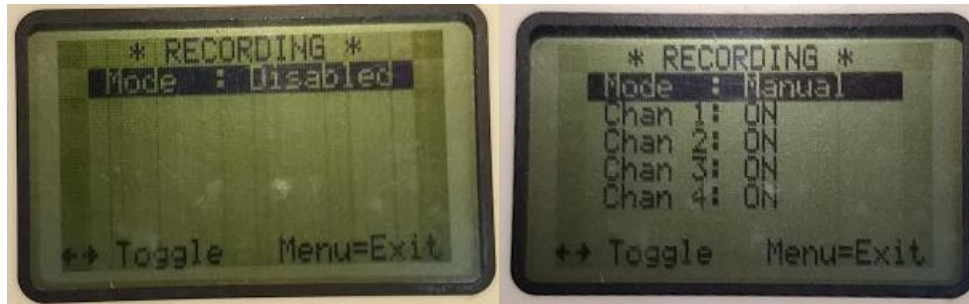


Figura 5.2.12 Opción de captura de datos dentro de la tarjeta de memoria

6) El paso siguiente consiste en realizar el balanceo para establecer un estado inicial para los instrumentos de medición sin deformaciones (figura 5.2.13). Para lo cual, estando en la interfaz de captura de datos, se presiona el botón "BAL", entonces el P3 tardara unos segundos en el balanceo para finalmente proceder a guardar la configuración por medio del botón "REC" (figura 5.2.14).



Figura 5.2.13 Balanceo de los sensores ante las alteraciones



Figura 5.2.14 Guardado de los ajustes por balanceo

Una vez que se ha guardado la configuración se mostrará la leyenda "Setup Saved", en ese momento los sensores empezarán a reportar valores a causa de las deformaciones sobre la superficie de estudio, mostrando un estado inicial con valores en cero (figura 5.2.15).



Figura 5.2.15 Estado inicial para la captura de datos

7) Al iniciar una prueba si se ha optado por el uso de la captura automática de datos, se deberá presionar el botón "RECORD" y se mostrará la leyenda "Opening Memory Card" (figura 5.2.16) con esto se creará un nuevo archivo de texto con los valores reportados para el intervalo de tiempo establecido y comenzará la captura (figura 5.2.17).



Figura 5.2.16 Inicio de la captura de datos

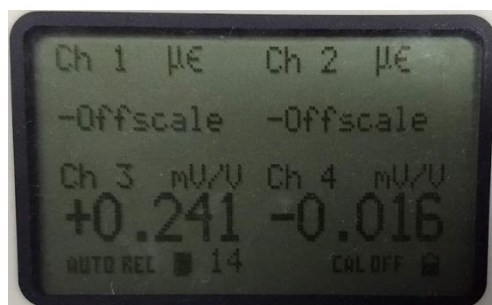


Figura 5.2.17 Captura de datos en proceso

8) Para finalizar la captura de datos se deberá presionar nuevamente el botón "RECORD" y se desplegará la leyenda "Saving Data" (figura 5.2.18). Con esto quedarán guardados los datos de la prueba y podrán visualizarse en cualquier equipo de cómputo con lector de notas.

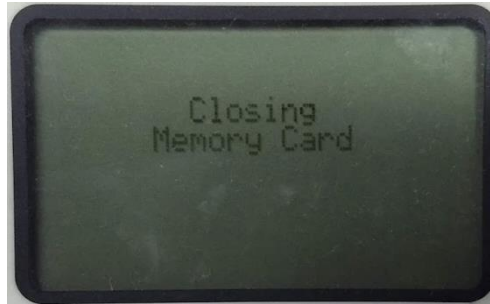


Figura 5.2.18 Captura de datos finalizada

Procesamiento de los datos capturados de los deformímetros extensométricos y los sensores de deformación

Una vez que se han capturado los datos de la tarjeta de memoria se puede extraer un archivo .txt que contendrá los valores capturados, tal como se muestra en la figura 5.2.19 donde se puede ver la información general de la prueba, las lecturas de cada canal y las unidades asociadas a cada canal.

```
FE4E8E56.TXT: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Wishay Model P3 Strain Indicator and Recorder
Serial No: 0164908
File Created: 07/30/19 10:52:30
Ch 1 Ch 2 Ch 3 Ch 4
ue ue mV/V mV/V
-----
10:52:31 +00002 +00000 +0.000 -0.000
10:52:32 +00003 +00000 +0.000 -0.000
10:52:34 +00004 +00000 +0.000 -0.000
10:52:35 +00004 +00000 +0.000 -0.000
10:52:37 +00005 +00000 +0.000 -0.000
10:52:38 +00005 +00000 +0.000 -0.000
10:52:40 +00005 +00000 +0.000 -0.000
10:52:41 +00005 +00000 +0.000 -0.000
10:52:43 +00005 +00000 +0.000 -0.000
10:52:44 +00005 +00000 +0.000 -0.000
10:52:46 +00005 +00000 +0.000 -0.000
10:52:47 +00005 +00000 +0.000 -0.000
10:52:49 +00006 +00000 +0.002 -0.004
10:52:50 +00013 -00006 +0.057 -0.055
10:52:51 +00013 -00007 +0.060 -0.056
10:52:53 +00013 -00007 +0.061 -0.057
10:52:54 +00013 -00007 +0.061 -0.058
10:52:56 +00013 -00007 +0.062 -0.058
Ln 1, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8
```

Figura 5.2.19 Ejemplo del archivo de texto creado por el P3 para una prueba

Para la obtención de los valores de deformación se sigue el procedimiento mostrado a continuación:

a) Deformímetros extensométricos

Para los DE las lecturas reportadas por el P3 corresponden a las deformaciones sobre la superficie sobre la cual se instalaron los DE, tal como se muestra en la ecuación 5.2.1.

$$\varepsilon_{DE} = \text{Valor reportado por el DE} \quad (5.2.1)$$

Donde:

ε_{BDI} : Deformación reportada por el DE

b) Sensores de deformación

Las lecturas reportadas por los BDI se presentan en (mV/V) y para obtener los valores de deformación se requiere del uso de una constante denominada como "Factor de conversión" (Gage Factor en inglés) el cual es proporcionado por el fabricante, la cual para los sensores de deformación usados en la presente tesis tiene un valor de:

$$GF_{BDI} = 500 \frac{\mu\varepsilon}{\frac{mV}{V}}$$

Por lo cual para obtener los valores de deformaciones se deberán multiplicar las lecturas por el factor de conversión como se muestra en la ecuación 5.2.2.

$$\varepsilon_{BDI} = GF_{BDI} \cdot (\text{Lectura del BDI}) \quad (5.2.2)$$

Donde:

ε_{BDI} : Deformación reportada por el BDI

GF_{BDI} : Factor de conversión del BDI

Adquisición de datos para los sensores de cuerda vibrante

Para el SCV tenemos el caso de que para la captura de datos se utilizó un sistema compuesto por un convertidor analógico, una fuente de poder, un equipo de cómputo y cables auxiliares para la conexión entre equipos el cual se presenta en la figura 5.2.20. Cada sensor deberá conectarse en a un convertidor analógico pudiéndose usar una fuente de alimentación para dos convertidores analógicos. De igual manera el equipo de cómputo es capaz de usar tantos sensores como puertos USB posea.

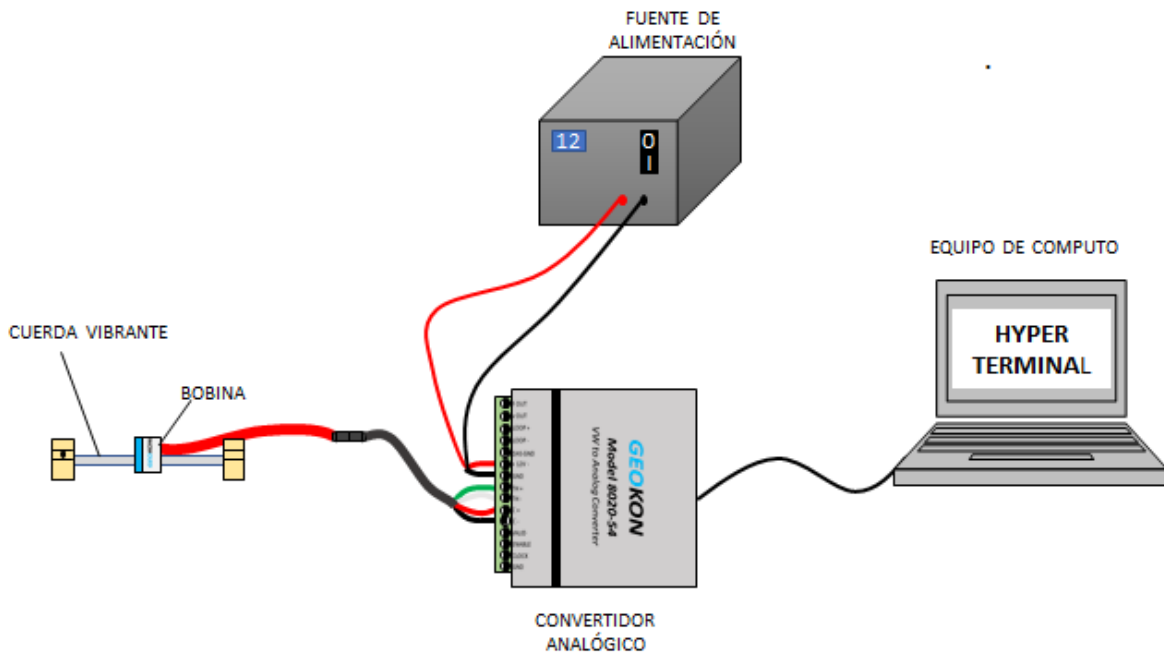


Figura 5.2.20 Conexión completa del sistema para los SCV

Conexiones de los sensores de cuerda vibrante

1) Para llevar a cabo la conexión del sistema del sensor de cuerda vibrante primero se debe conectar la bobina del SCV al convertidor analógico (figura 5.2.21).

El convertidor analógico se conectará a la bobina por medio de un cable auxiliar, el cual se muestra en la figura 5.2.22.



Figura 5.2.21 Convertidores analógicos



Figura 5.2.22 Cables de conexión entre la bobina del sensor y el cable de conexión con el convertidor analógico

Los cables auxiliares se conectarán de acuerdo a la figura 5.2.23 en donde se puede apreciar a que entrada del convertidor analógico se debe conectar.



Figura 5.2.23 Conexiones de los cables auxiliares con el convertidor analógico

Para fijar los cables se usará un desarmador para abrir y cerrar las entradas de los convertidores analógicos, tal como se muestra en la figura 5.2.24.

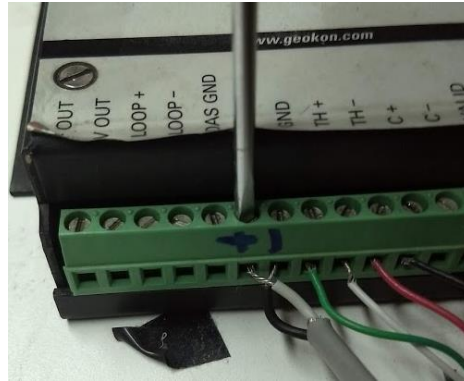


Figura 5.2.24 Apertura y cierre de las entradas del convertidor analógico

2) Los convertidores analógicos deben conectarse a una fuente de alimentación, la conexión de los convertidores analógicos se realiza como se ve en la figura 5.2.25 a y se deberán conectar a la fuente de alimentación como se muestra en la misma figura.

Cabe mencionar que para cada convertidor se requiere un voltaje de 12 V y se debe tener mucha precaución en que no se supere dicho voltaje para mantener los convertidores analógicos en buen estado.



Figura 5.2.25 Conexión del convertidor analógico con la fuente de poder

3) Una vez conectado el convertidor analógico al sensor de cuerda vibrante y a la fuente de alimentación se procederá a realizar la conexión

con el equipo de cómputo. El convertidor analógico posee una salida tipo VGA y debido a que el programa Hyperterminal se encuentra configurado para captar la información vía USB se usara un adaptador de salida VGA a salida USB, como se muestra en la figura 5.2.26.



Figura 5.2.26 Conexión del convertidor analógico con la fuente de poder

4) Finalmente se conectó según la convención que habíamos establecido anteriormente (para el caso de la barra metálica tipo 01), en donde asignamos el canal 01 (COM01) a nuestro sensor superior identificado con el color verde y el canal 02 (COM02) a nuestro canal inferior identificado con el color rojo (figura 5.2.27).

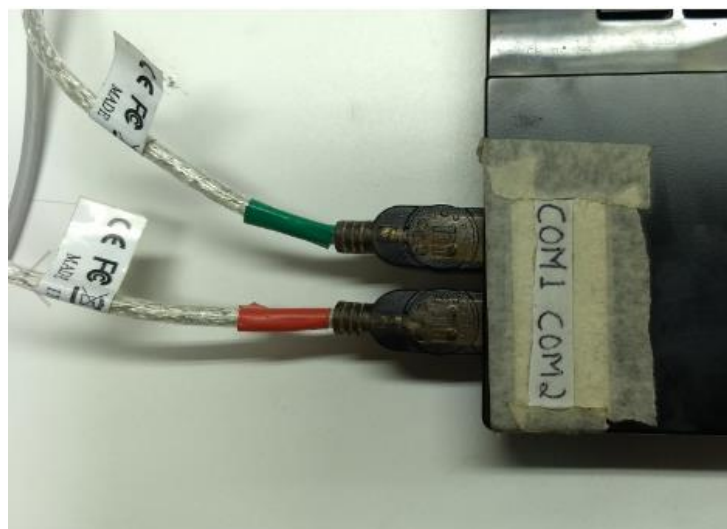


Figura 5.2.27 Conexión del convertidor analógico al equipo de computo

Metodología de captura para los sensores de cuerda vibrante

Con ayuda del equipo del instituto de ingeniería (el cual tiene instalado el software necesario para la prueba) se realizaron las pruebas de la presente tesis.

Para la captura de datos del sistema de cuerda vibrante se hizo uso del software "Hyperterminal" cuyo procedimiento de operación se muestra a continuación.

1) Ingresaremos al programa Hyperterminal (figura 5.2.28)



Figura 5.2.28 Icono del software Hyperterminal

2) Una vez abierto el programa se pide asignar un nombre con el cual se guardará la configuración del sistema.

Nota: El programa debe ejecutarse según el número de sensores que se usarán.

A continuación, en la figura 5.2.29 se muestra la interfaz principal del programa.

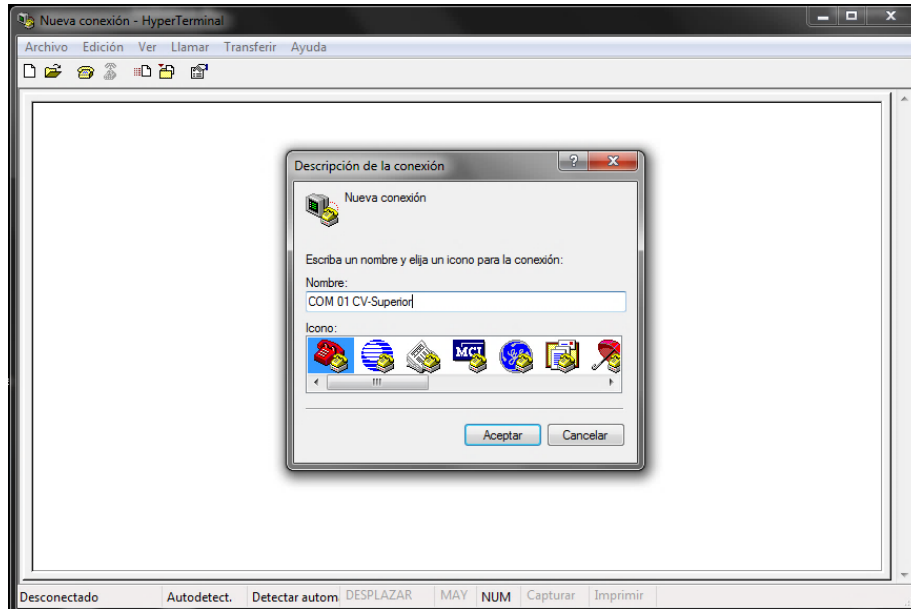


Figura 5.2.29 Interfaz principal del programa y asignación del nombre para la configuración del sensor superior

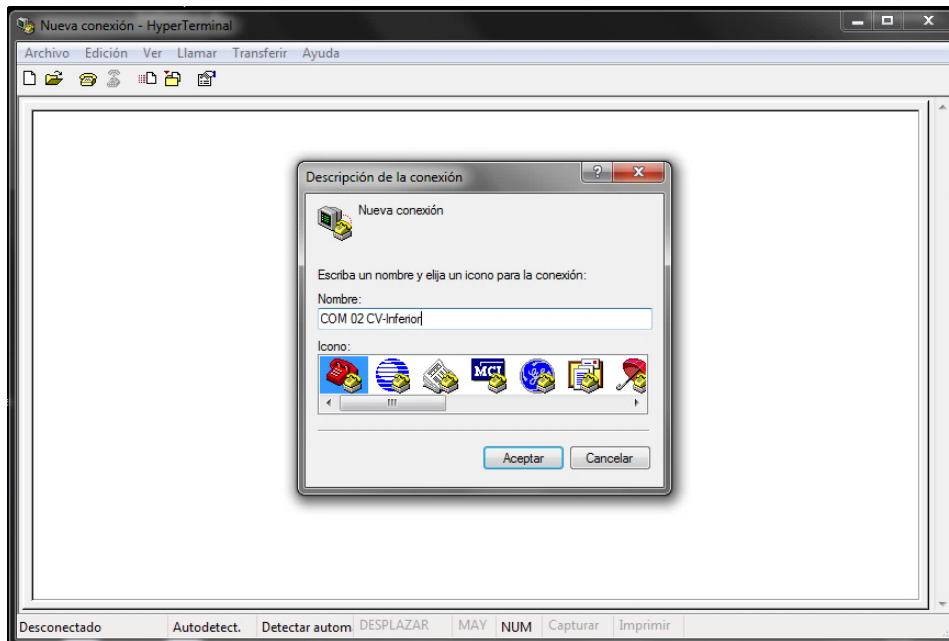


Figura 5.2.30 Interfaz principal del programa y asignación del nombre para la configuración del sensor inferior

3) Asignar el canal que será usado para cada sensor con el comando "Conectar usando" (figura 5.2.31) asignando COM 1 (Para el sensor superior) y COM 2 (Para el sensor inferior) para el caso de las barras metálicas.

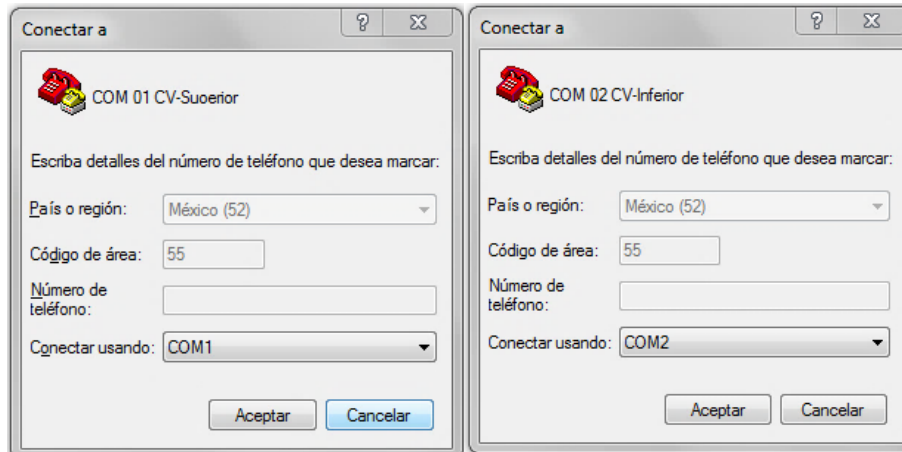


Figura 5.2.31 Asignación de los canales para los sensores

4) El paso siguiente será configurar el puerto de cada sensor con la configuración como se muestra en la figura 5.2.32.

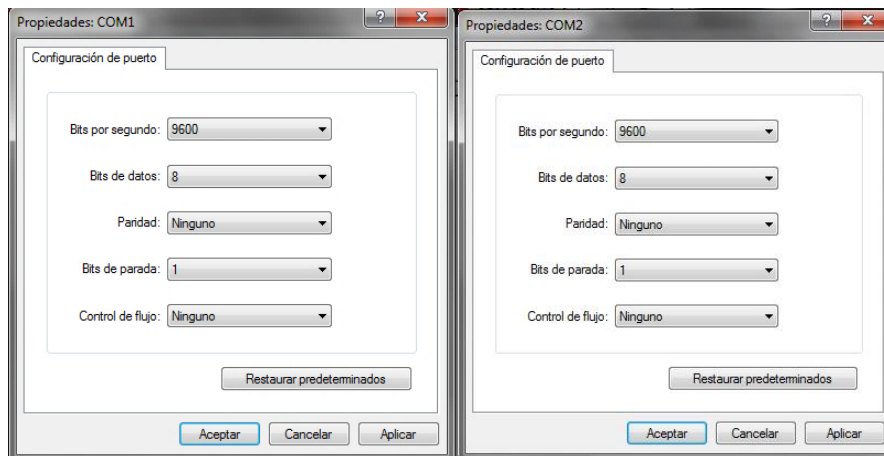


Figura 5.2.32 Configuración que se debe asignar a cada sensor

5) Una vez configurado el sistema se selecciona la opción "Aceptar" y el sensor empieza con la captura de datos (figura 5.2.33).

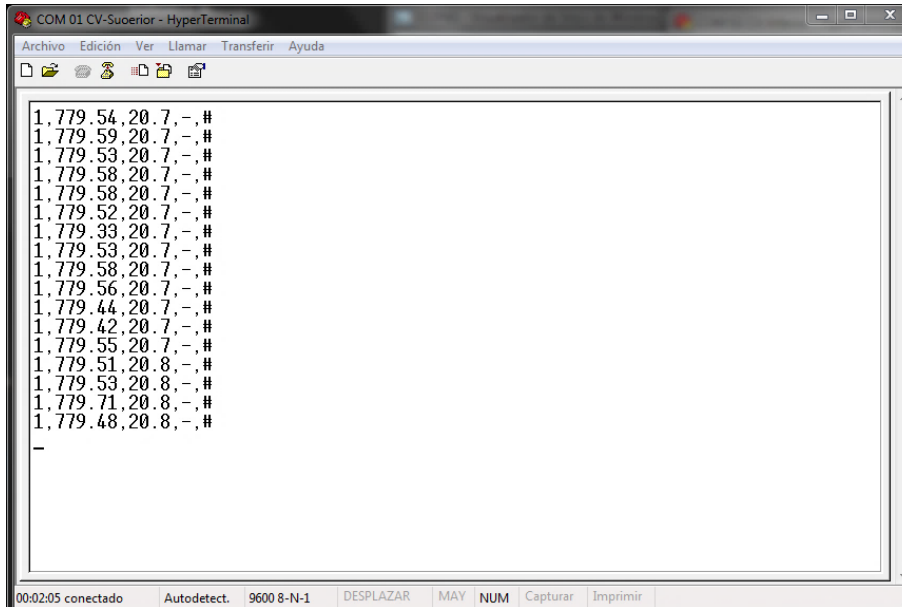


Figura 5.2.33 Registro de datos capturados del sensor superior

6) Para generar un archivo con la información capturada se debe ir al menú "Transferir" y seleccionar el comando "Capturar texto" (figura 5.2.34) el cual nos genera un archivo con la información reportada por el sensor.

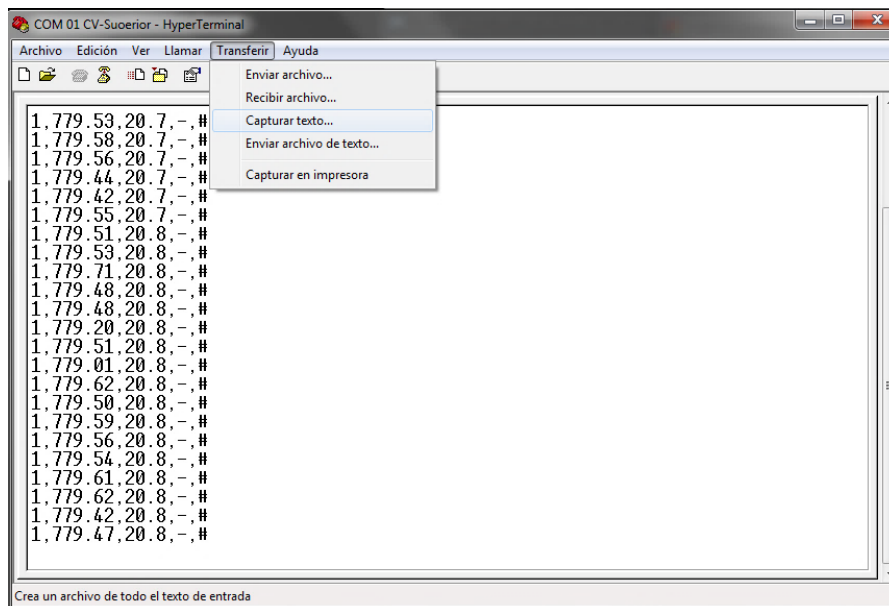


Figura 5.2.34 Comando de captura de texto

7) Una vez seleccionado el comando, el programa solicitará la ubicación en donde será generado el archivo (figura 5.2.35) y una vez establecida

la ubicación se asigna el nombre con el que se guardará el archivo con extensión .txt (figura 5.2.36).

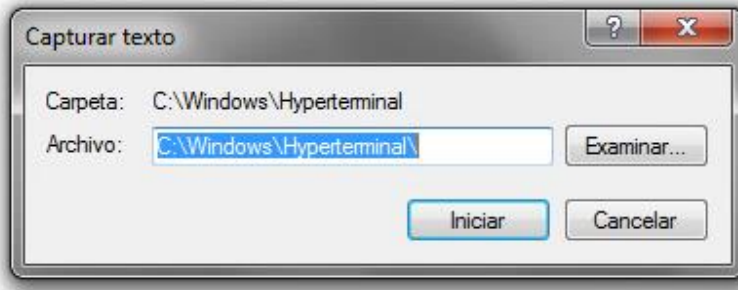


Figura 5.2.35 Ventana para especificar la ubicación donde se generará el archivo

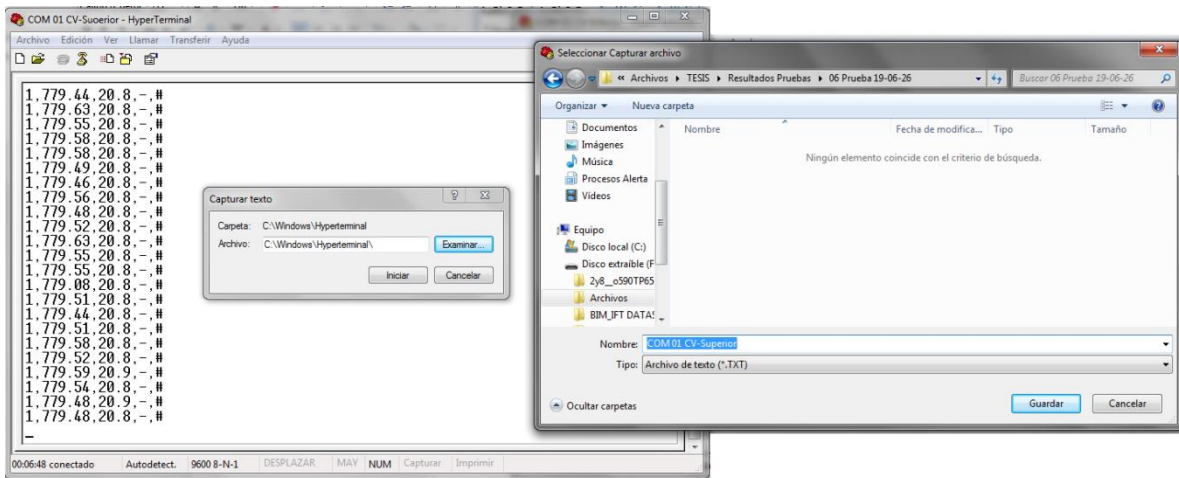


Figura 5.2.36 Selección de la carpeta donde se almacenara el archivo y asignación del nombre del archivo

8) Ya habiendo seleccionado la ubicación del archivo el programa estará listo para iniciar la captura de datos.

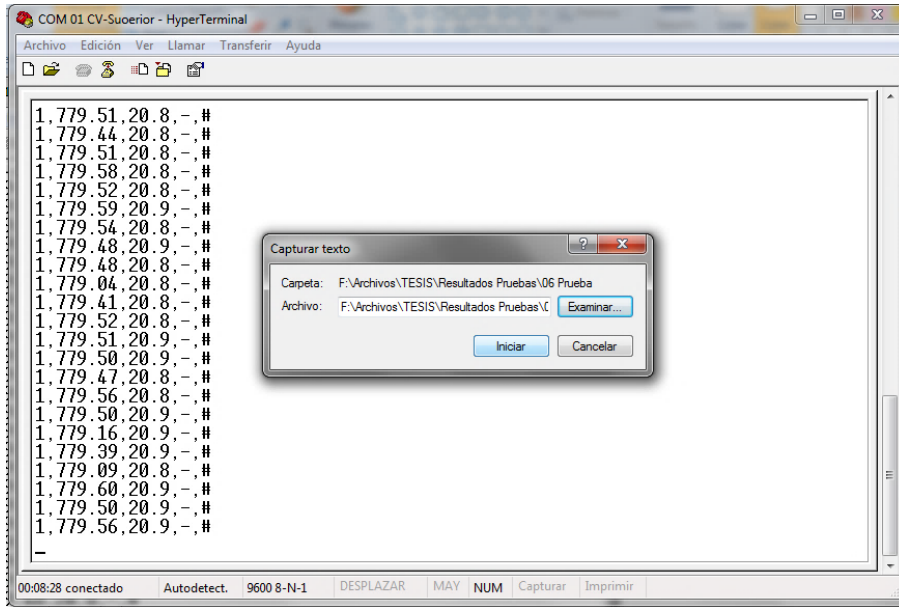


Figura 5.2.37 Programa listo para realizar la captura de datos

Nota: Cabe mencionar que los datos que sean guardados una vez aplicado el comando "Iniciar" (figura 5.2.37) corresponden a los que se generaran a partir de la emisión del comando, debido a esto los datos que fueron generados con anterioridad no serán guardados, estos únicamente nos sirven para monitorear el correcto funcionamiento del sistema con los rangos de operación establecidos por el fabricante.

9) Cuando se haya finalizado con la captura de datos se procederá a cerrar el sistema y aparecerán las ventanas que se muestran en las figuras 5.2.38 y 5.2.39, para la primera ventana debemos seleccionar la opción "Si" y para la segunda ventana la opción "no".

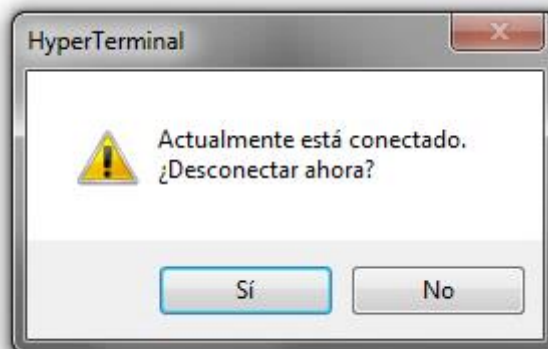


Figura 5.2.38 Ventana para terminar el proceso de captura de datos

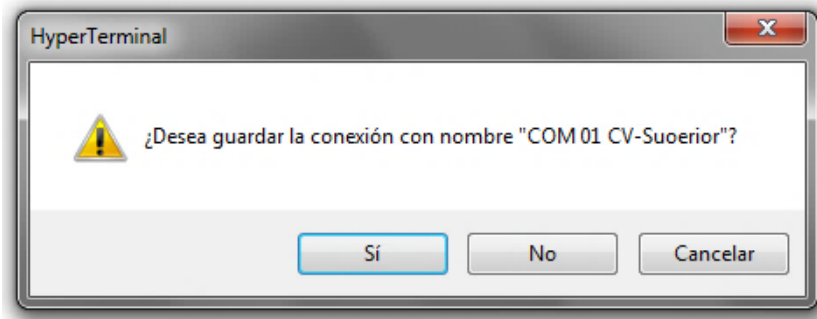


Figura 5.2.39 Ventana para guardar la configuración de la captura

El procedimiento para la obtención de las deformaciones a partir de la información capturada se presenta a continuación.

Procesamiento de los datos capturados de los sensores de cuerda vibrante

Al terminar con la metodología descrita se generarán los archivos .txt los cuales contendrán la información capturada.

Una vez que se ha concluido la prueba se genera un archivo .txt con el nombre que se asignó durante la metodología descrita previamente (paso 7) que contendrá los valores capturados de la prueba, tal como se muestra en la figura 5.2.40.

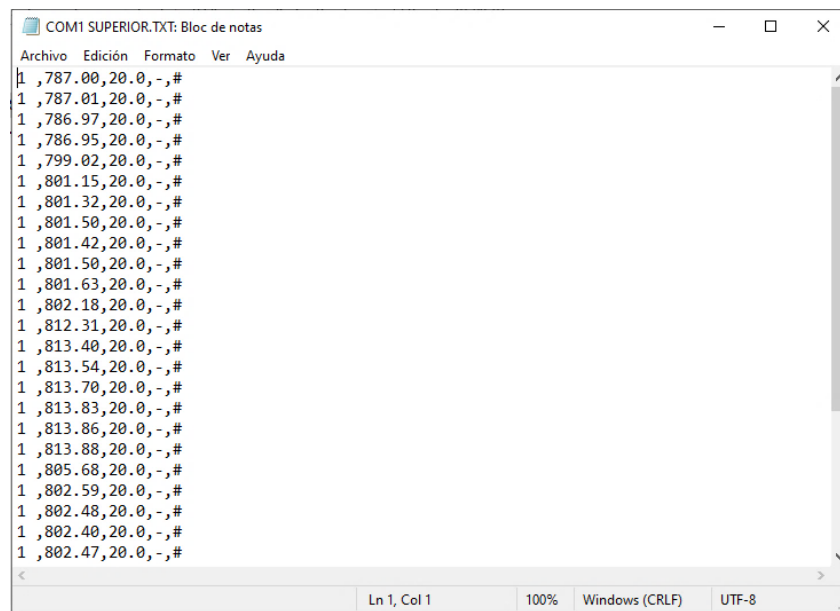


Figura 5.2.40 Ejemplo del archivo de texto creado el programa Hyperterminal

Para la obtención de los valores de deformación se sigue el procedimiento mostrado a continuación:

a) Sensores de deformación

Las lecturas reportadas por los SCV se presentan en (Hz²) y para obtener los valores de deformación se hará uso de la ecuación (5.4) que será aplicable para los SCV usados en la presente tesis, en caso contrario se deberá consultar los manuales de operación del fabricante dependiendo de los equipos empleados.

Del archivo .txt generado por el programa Hyperterminal (figura 5.73) se genera la tabla 5.1 en donde a cada lectura (segunda columna de la figura 5.73) se le asigna un número de lectura y se procede a restar la lectura inicial L_0 a las lecturas posteriores, de la cual resulta la tercer columna de la tabla, la cual nos servirá para obtener los valores de deformación.

Tabla 5.2.1 Ajuste de las lecturas obtenidas por los SCV

Lecturas SCV		
Número de lectura	Lecturas	
	Obtenidas	Ajustadas
	[Hz ²]	[Hz ²]
0	$L_0 SCV$	$L_0 SCV$
1	$L_1 SCV$	$L_1 SCV - L_0 SCV$
2	$L_2 SCV$	$L_2 SCV - L_0 SCV$
3	$L_3 SCV$	$L_3 SCV - L_0 SCV$
...
...
n	$L_n SCV$	$L_n SCV - L_0 SCV$

Para obtener los valores de deformaciones se deberá aplicar la ecuación 5.2 a las lecturas ajustadas de la tabla 5.1.

$$\varepsilon_{SCV} = 4.062 \frac{\mu\varepsilon}{Hz^2} \cdot (Lectura\ ajustada\ del\ SCV) \quad (5.2.3)$$

Donde:

ε_{SCV} Deformación reportada por el SCV

Adquisición de datos para los sensores de fibra óptica

Para los SFO tenemos el caso de que para la captura de datos se utilizó el un sistema compuesto por un Interrogador de Detección Óptica (Optical Sensing Interrogator) modelo si425 (figura 5.2.41) el cual es el equipo para la operación de los SFO y un equipo de cómputo con el programa si425_V1.41 el cual permite llevar a cabo la captura de datos desde el equipo de cómputo por medio de un cable ethernet conectado entre el interrogador de detección óptica (si425) y el equipo de cómputo.



Figura 5.2.41 Interrogador de detección óptica modelo si425

Conexiones de los sensores de fibra óptica

Para ejemplificar la conexión completa de un sensor de fibra óptica, a continuación, se muestra la figura 5.2.42 en donde se aprecia un SFO es conectado al canal 1 del si425 (al cual se le puede añadir una extensión de cable en caso de ser requerida) que a su vez se conecta a un equipo de cómputo por medio de un cable ethernet.

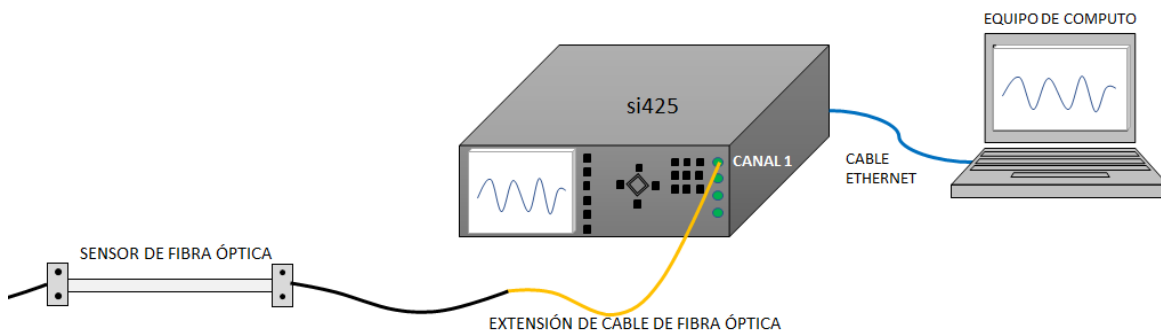


Figura 5.2.42 Sistema de captura con un SFO

Nota: Durante la instalación de los sensores de fibra óptica se debe tener cuidado con los cables que contienen a la fibra óptica, ya que estos no deben estar sometidos a una condición que les haga sufrir alguna curvatura muy marcada, debido a que podría dañar el SFO.

1- El primer paso consiste en conectar el si425 a la corriente y presionar el botón de encendido que se encuentra en la parte trasera del si425 (figura 5.2.43)



Figura 5.2.43 Botón de encendido del si425

2- Una vez que el si425 entra en operación se debe conectar el equipo de cómputo al si425 con ayuda de un cable ethernet (figura 5.2.44).



Figura 5.2.44 Conexión entre los equipos con un cable ethernet

3- Finalmente se debe conectar el extremo del SFO en algún canal del si425 tal como se muestra en la figura 5.2.45.



Figura 5.2.45 Conexión del SFO al si425

Metodología de captura para los sensores de fibra óptica

1- Para la captura de datos del sensor de fibra óptica desde el equipo de cómputo se accede al programa "si425_V1.41" (figura 5.2.46).

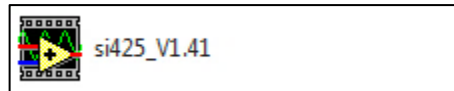


Figura 5.2.46 Icono del programa si425_V1.41 en cual se encuentra instalado en un equipo de cómputo del Instituto de Ingeniería de la UNAM

2- Se procede a asignar la misma dirección IP mostrada en el equipo si425 al programa en la computadora (figura 5.2.27)

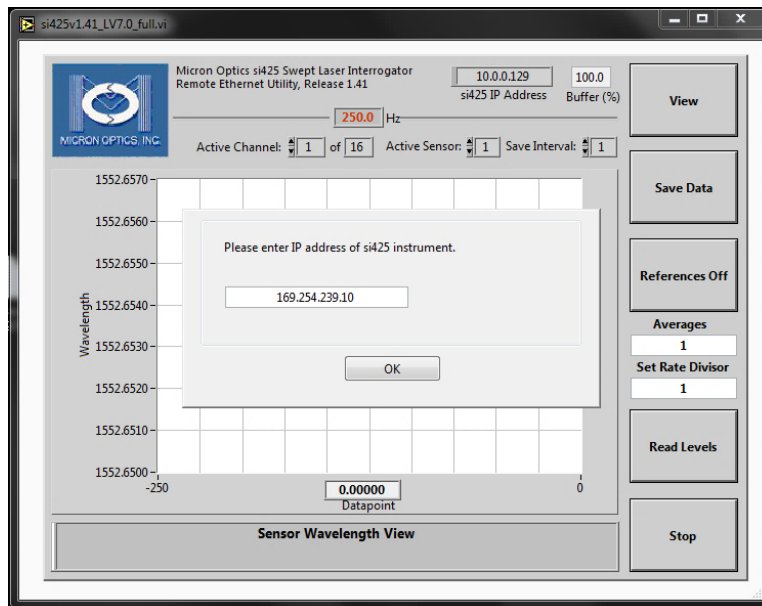


Figura 5.2.47 Interfaz inicial del programa y emparejamiento de la dirección IP

3- Una vez emparejada la dirección IP se despliega la interfaz principal del programa (figura 5.2.48) se procede a configurar el número de muestras por segundo que se requieren. En la presente tesis se configuro el equipo para tomar mediciones a cada segundo.

El procedimiento para configurar la captura de datos a 1 segundo consiste en modificar la ventana con la leyenda "Set Rate Divisor" inicialmente con un valor de 1 asignando el valor de 250 el cual modificara automáticamente la ventana "Averages" a un valor de 10 tal como se muestra en la figura 5.2.49.

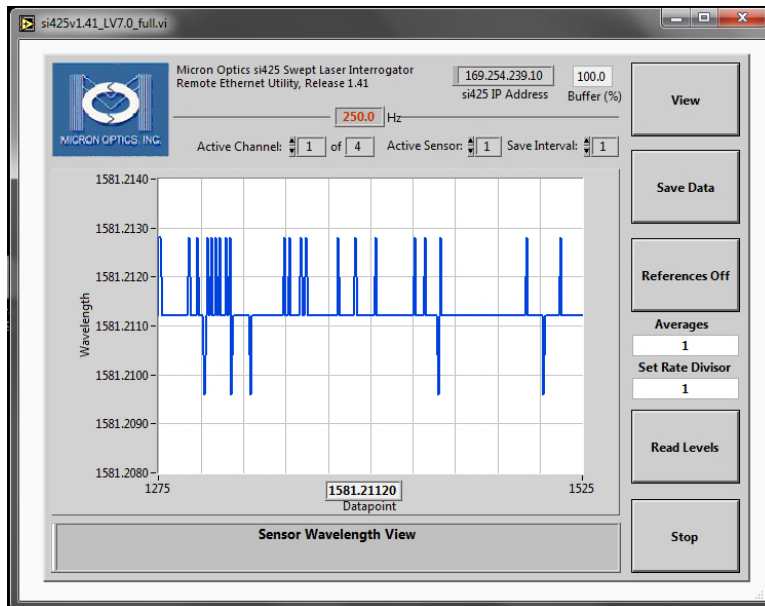


Figura 5.2.48 Interfaz principal del programa una vez emparejadas las direcciones IP

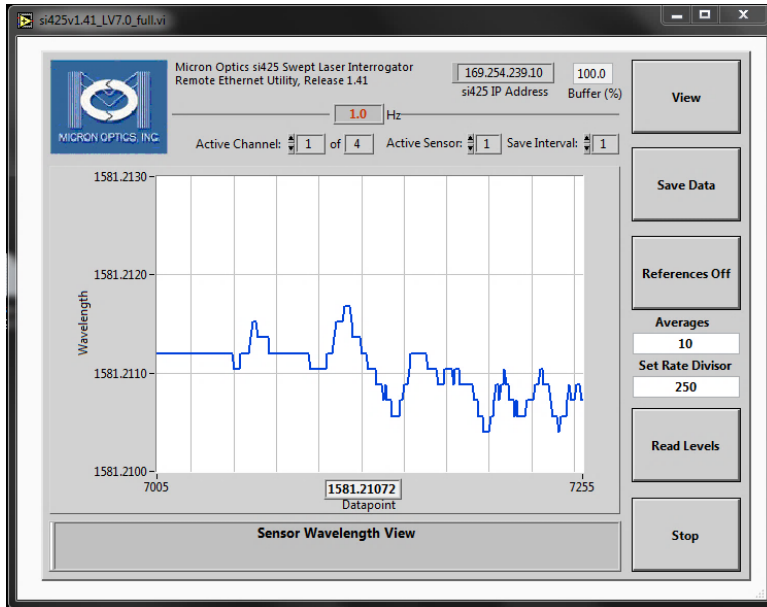


Figura 5.2.49 Sistema configurado para capturar datos cada segundo

4- Como parte de la metodología se debe revisar que los SFO conectados se encuentren en operación, para ello se puede revisar desde el equipo o desde el software con el comando "View" con el cual cambiaremos de interfaz hasta llegar a la interfaz mostrada en la figura 5.2.50.

	Timestamp	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4
1	1561561402.089	1581.210	1512.720	0.000	0.000
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					

Figura 5.2.50 Ventana en donde se aprecian los valores en tiempo real de cada SFO

En la ventana de la figura 5.2.50 se muestra en tiempo real los valores reportados por los SFO y en caso de detectar que algún sensor se haya conectado y no se muestre en la ventana se procederá a revisar la conexión del sensor en cuestión.

5- Una vez que se ha revisado que todos los sensores se encuentran en operación se regresa a la interfaz principal para empezar la prueba (figura 5.2.21).

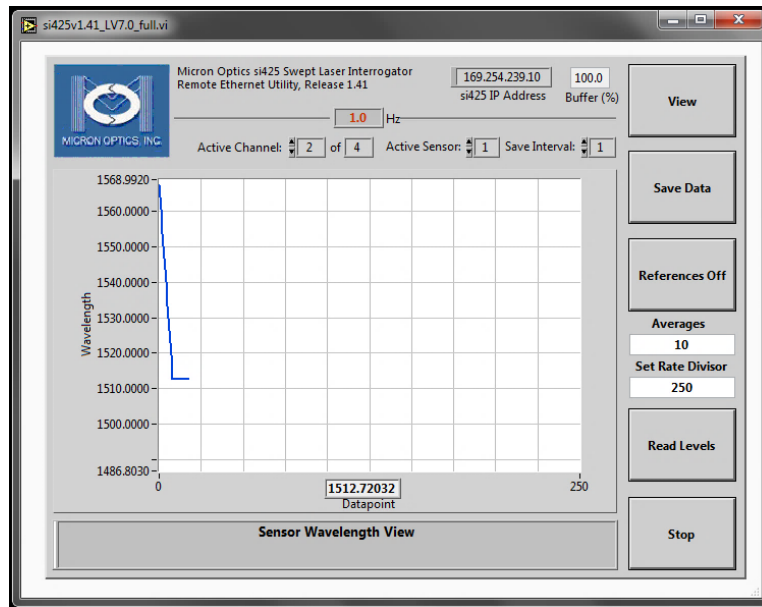


Figura 5.2.51 Sistema en operación listo para la captura de datos

6- El siguiente paso será llevar a cabo la captura de datos, para lo cual se selecciona el comando "Save Data" el cual abrirá una ventana (figura 5.2.52) en donde se especifica la ubicación en donde será guardado el archivo generado por el sistema con la información capturada.

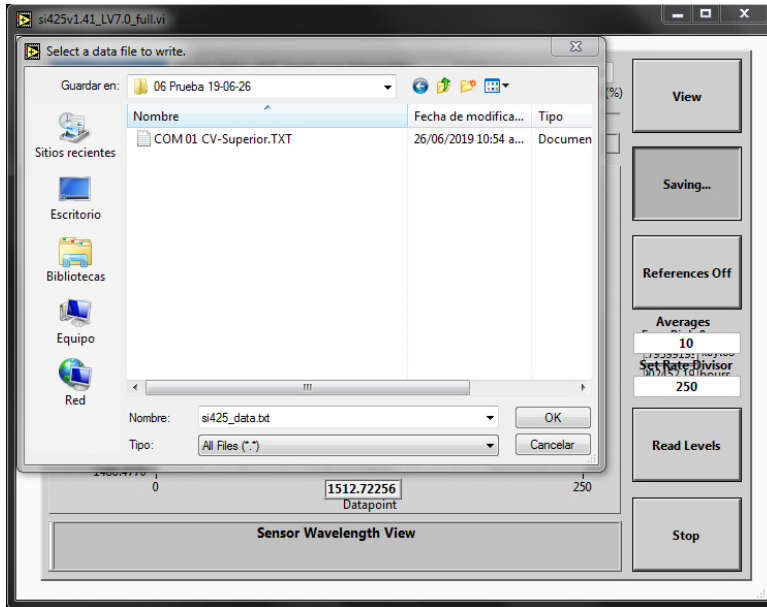


Figura 5.2.52 Selección del directorio donde se guardarán los resultados

7- Una vez asignada la ubicación se selecciona la opción "OK", cabe mencionar que en ese instante la captura de datos comenzará.

En ese entonces la leyenda del comando "Save Data" cambiara entonces a "Saving" (figura 5.2.53).

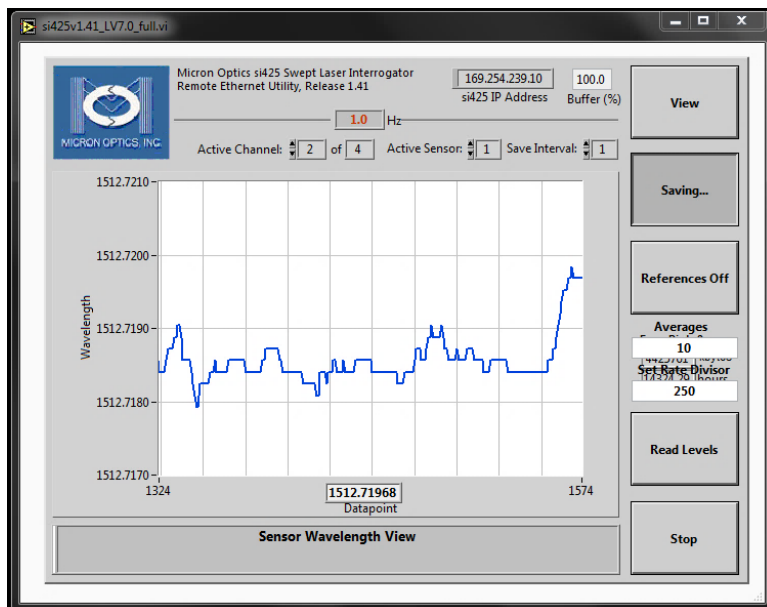


Figura 5.2.53 Sistema capturando datos

8- Una vez finalizado la prueba en cuestión, para finalizar la captura de datos se procede a presionar el botón con la leyenda "Saving" y regresara

a su leyenda original "Save Data" con ello indicando que la prueba ha sido guardada de forma correcta.

El procedimiento para la obtención de las deformaciones a partir de la información capturada se presenta a continuación.

Procesamiento de los datos capturados de los sensores de fibra óptica

Una vez que se ha concluido la prueba se genera un archivo .txt con el nombre que se asignó durante la metodología descrita previamente, el cual contendrá los valores de longitud de onda y el tiempo correspondiente en el que fueron capturados, tal como se muestra en la figura 5.2.54.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda		
1561564363.423	1	1	0	0	1581.211	1512.760
1561564364.423	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564365.423	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564366.423	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564367.422	1	1	0	0	1581.208	1512.760
1561564368.422	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564369.422	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564370.422	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564371.422	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564372.422	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564373.422	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564374.422	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564375.421	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564376.421	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564377.421	1	1	0	0	1581.208	1512.760
1561564378.421	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564379.421	1	1	0	0	1581.208	1512.760
1561564380.421	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564381.421	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564382.420	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564383.420	1	1	0	0	1581.208	1512.760
1561564384.420	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564385.420	1	1	0	0	1581.210	1512.760
1561564386.420	1	1	0	0	1581.210	1512.760

Figura 5.2.54 Archivo generado por el si425

Para la obtención de los valores de deformación se sigue el procedimiento mostrado a continuación:

b) Sensores de Cuerda Vibrante

Las lecturas reportadas por los SCV se presentan en (nm) y para obtener los valores de deformación de igual manera se requiere del uso de un

“Factor de conversión” (Gage Factor) el cual es proporcionado por el fabricante, la cual para los SFO serán particular para cada sensor y para los SFO usados en la presente tesis tienen los siguientes valores:

Tabla 5.2.2 Factores de conversión para los sensores de fibra óptica

Factor de conversión - SFO						
TS12-035	TS12-036	TS12-038	TS12-040	TS12-041	TS12-043	TS12-044
FG (pm/με)	FG (pm/με)	FG (pm/με)	FG (pm/με)	FG (pm/με)	FG (pm/με)	FG (pm/με)
1.307	1.304	1.317	1.376	1.344	1.354	1.378

Del archivo .txt generado por el programa si425_V1.41 (se genera la tabla 5.2.2 en la cual a cada lectura de los SFO (columnas 6 y 7 de la figura 5.2.54) se le asigna un tiempo de captura (primera columna de la figura 5.2.54).

Tabla 5.2.3 Ajuste de las lecturas obtenidas por los SFO

Fibra óptica			
Tiempo		Longitud de onda	
Reportado	Ajustado	Obtenidas	Ajustadas
(s)	(s)	(nm)	(nm)
Ts_0	$Ts_0 - Ts_0$	$L_0 SFO$	$L_0 SFO$
Ts_1	$T_1 - Ts_0$	$L_1 SFO$	$L_1 SFO - L_0 SFO$
Ts_2	$T_2 - Ts_0$	$L_2 SFO$	$L_2 SFO - L_0 SFO$
Ts_3	$T_3 - Ts_0$	$L_3 SFO$	$L_3 SFO - L_0 SFO$
...
...
Ts_n	$T_n - Ts_0$	$L_n SFO$	$L_n SFO - L_0 SFO$

Por lo cual para obtener los valores de deformaciones se deberán dividir las lecturas de la longitud de onda ajustada por el factor de galga como se muestra en la ecuación 5.4.

$$\varepsilon_{SFO} = \frac{\text{Longitud de onda ajustada del SFO}}{GF_{SFO}} \quad (5.2.4)$$

Donde:

ε_{SFO} : Deformación reportada por el SFO

GF_{SFO} : Factor de conversión del SFO

Finalmente se presenta la tabla 5.4, la cual resume las constantes que deben ser utilizadas para cada sensor para obtener las deformaciones.

Tabla 5.4 Constantes para la obtención de deformaciones

Factor de conversión - SFO						
TS12-035	TS12-036	TS12-038	TS12-040	TS12-041	TS12-043	TS12-044
FG (pm/ $\mu\epsilon$)	FG (pm/ $\mu\epsilon$)	FG (pm/ $\mu\epsilon$)	FG (pm/ $\mu\epsilon$)	FG (pm/ $\mu\epsilon$)	FG (pm/ $\mu\epsilon$)	FG (pm/ $\mu\epsilon$)
1.307	1.304	1.317	1.376	1.344	1.354	1.378
Factor de conversión - BDI						
Para todos los BDI usados en la presente prueba se tiene:				FG	500	$\mu\epsilon/mV/V$
Factor de conversión - SCV						
Para todos los SCV usados en la presente prueba se tiene:				FG	4.062	$\mu\epsilon/Hz^2$

5.3 El caso de dos barras metálicas en voladizo

En el presente apartado se presentan dos experimentos para el análisis y estudio de las deformaciones de dos barras instrumentadas con diferentes sensores en un punto de estudio, mientras éstas eran cargadas en sus extremos para inducir deformación.

El objetivo principal de estas pruebas es comparar el desempeño que los sensores usados y la confiabilidad de los resultados mediante la obtención del módulo de elasticidad de forma experimental y su comparación con el valor teórico.

5.3.1 Barra Tipo 01

5.3.1.1 Descripción del experimento de la barra Tipo 01

El experimento que a continuación se describe se realizó con ayuda de personal del Instituto de Ingeniería.

Dicho experimento consistió en una prueba de carga de una barra metálica. La barra se colocó de forma empotrada en un extremo y fue instrumentada con dos tipos de sensores de deformación (SCV y DE) tanto en la parte superior como en la inferior (figuras 5.3.1 y 5.3.2).

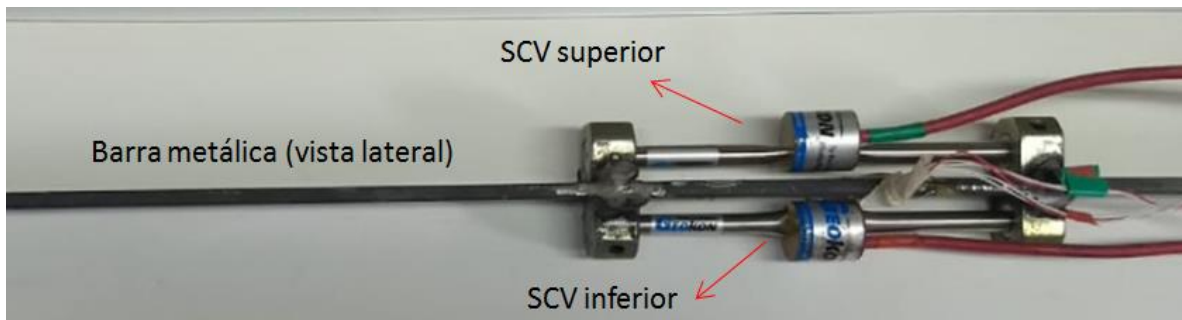


Figura 5.3.1 Sensores de cuerda vibrante colocados en la barra Tipo 01

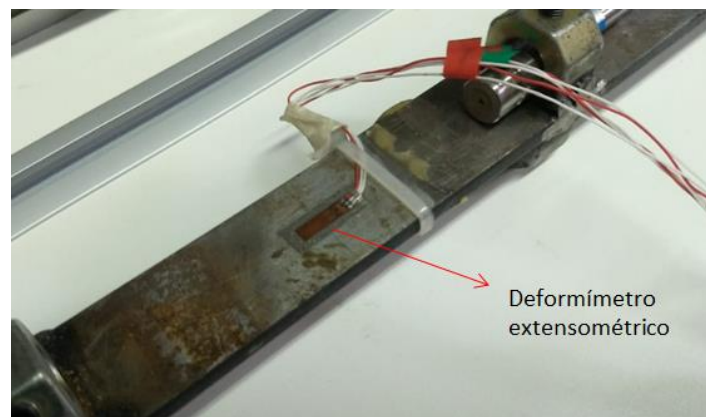


Figura 5.3.2 Deformímetro extensométricos colocado en la barra Tipo 01

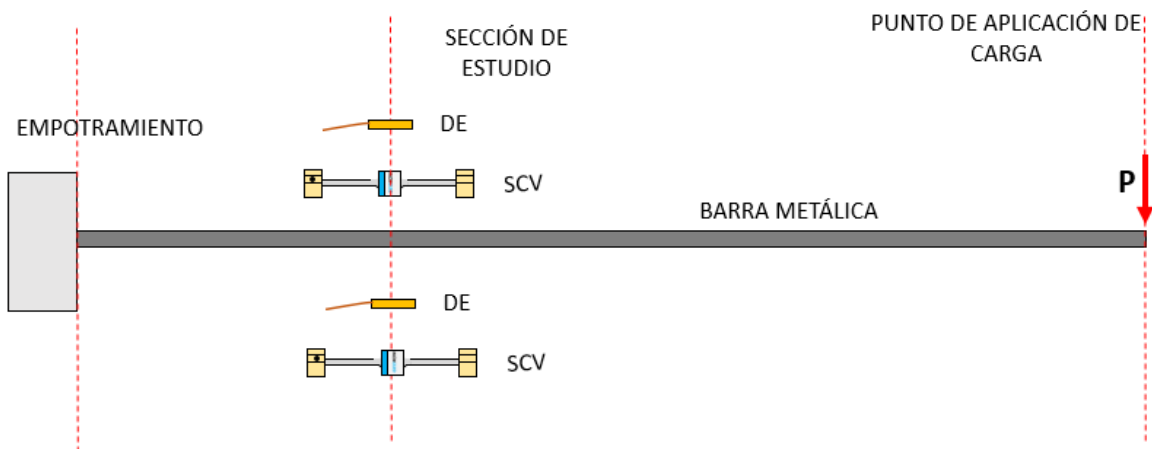


Figura 5.3.3 Esquema del experimento de la barra Tipo 01

El objetivo de la instrumentación del experimento fue el estudio del comportamiento de los sensores de deformación para evaluar su desempeño al comparar las deformaciones obtenidas por los sensores y las obtenidas mediante un modelo matemático (figura 5.3.3).

Las características geométricas del experimento se muestran a continuación en las figuras 5.3.4 y 5.3.5:

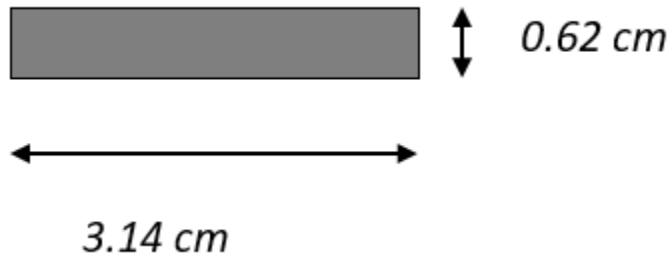


Figura 5.3.4 Sección transversal de la barra Tipo 01

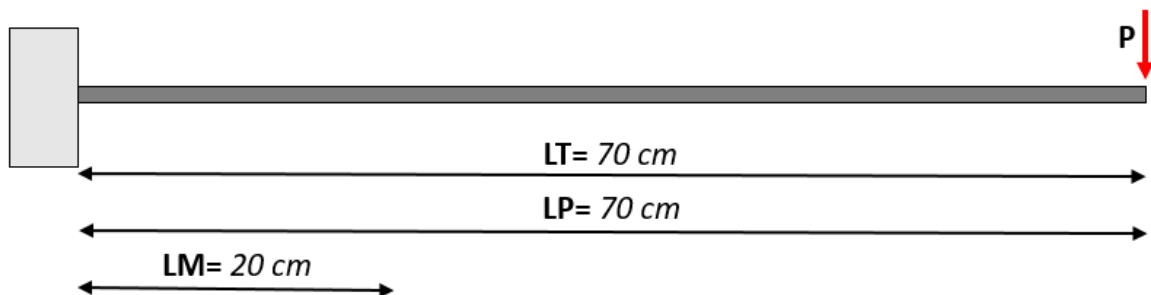


Figura 5.3.5 Corte longitudinal de la barra Tipo 01

Donde:

LM Es la distancia del empotramiento a la sección de estudio

LP Es la distancia del empotramiento al punto de aplicación de la carga

LT Es la longitud total de la barra metálica en voladizo

A la barra se le aplicaron nueve etapas de carga mostradas en la tabla 5.3.1 y en el gráfico 5.3.1 en un solo punto situado muy cerca del extremo no empotrado (figura 5.3.6). Dichas cargas fueron aplicadas con pequeñas placas de acero cuya masa fue determinada con una balanza electrónica, teniéndose cuatro placas con valores de 285 g, 249.2 g, 291.9 g y 498.6 g.



Figura 5.3.6 Esquema de la barra metálica deformada en las diferentes etapas de carga

Tabla 5.3.1 Etapas de carga para la barra Tipo 01

Etapa de carga	Carga [P] (kgf)
0	0
1	0.2837
2	0.5337
3	0.7837
4	1.0337
5	0.7837
6	0.5337
7	0.2837
8	0

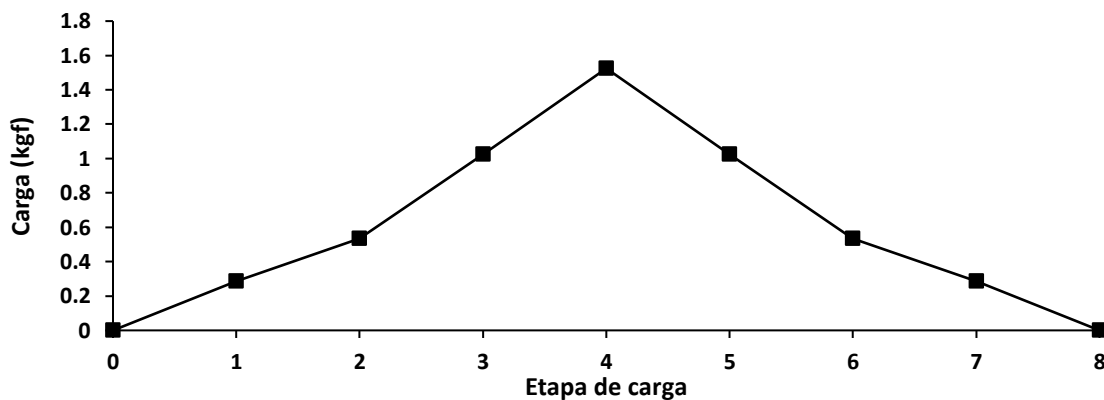


Gráfico 5.3.1 Etapas de carga para la barra Tipo 01

El experimento se realizó dentro un laboratorio y la duración de las pruebas no excedió los diez minutos, por lo que los efectos dados por el cambio de temperatura fueron despreciados.

5.3.1.2 Instrumentación de la barra Tipo 01

Los sensores con los que fue instrumentada la barra fueron los siguientes y su colocación puede consultarse a detalle en el capítulo 5.1:

- a) Deformímetros extensométricos (DE)
- b) Sensor de Cuerda Vibrante (SCV)

Los instrumentos se instalaron para realizar una medición de la deformación en un punto localizado a 20 (cm) a partir del empotramiento de la barra, a lo que llamaremos la sección de estudio o sección de interés (Figura 5.3.7).

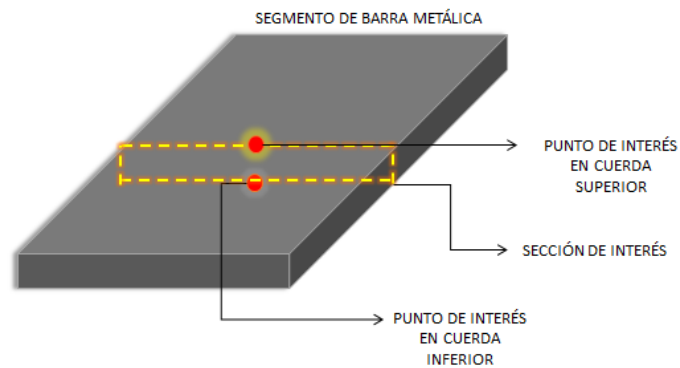


Figura 5.3.7 Puntos de interés

Con el fin de tener información de las fibras a compresión y a tensión de nuestro elemento se realizó la instalación de los instrumentos de medición en ambas caras de la barra (figura 5.3.8).

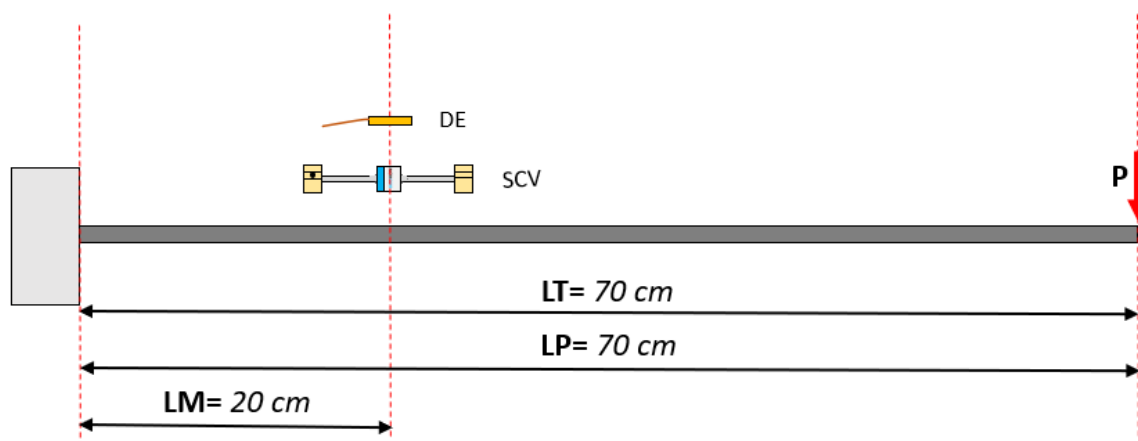


Figura 5.3.8 Localización de los sensores en la barra Tipo 01

Para fines de distinción de los instrumentos de medición, los ubicados en la cara superior fueron identificados (figura 5.3.9) con el color verde y los instrumentos ubicados en la cara inferior con el color rojo.

A continuación se muestra una imagen de como esta compuesto el sistema de medición, donde se aprecia la cara superior.

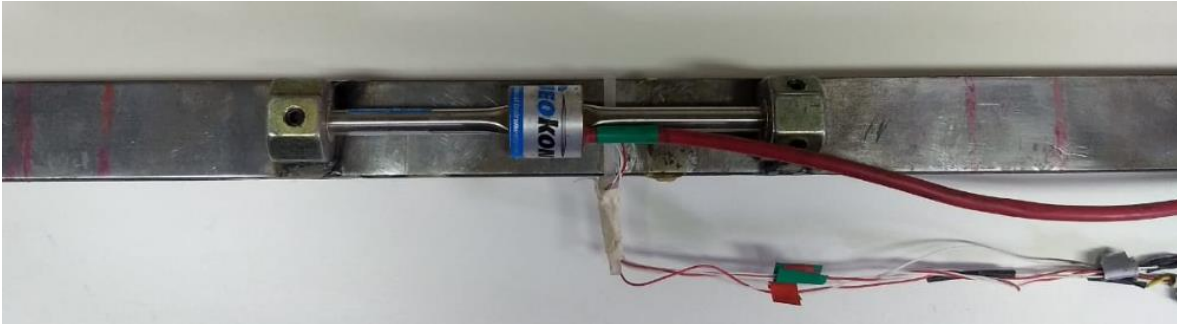


Figura 5.3.9 Instrumentación superior de la barra tipo 01, se aprecian las etiquetas verdes

5.3.1.3 Análisis e interpretación de resultados de la barra Tipo 01

En este apartado se muestra la información obtenida directamente de los sensores, además de las deformaciones resultantes del procesamiento de la información.

Información capturada por los deformímetros extensométricos y los sensores de cuerda vibrante

a) Información capturada por los deformímetros extensométricos

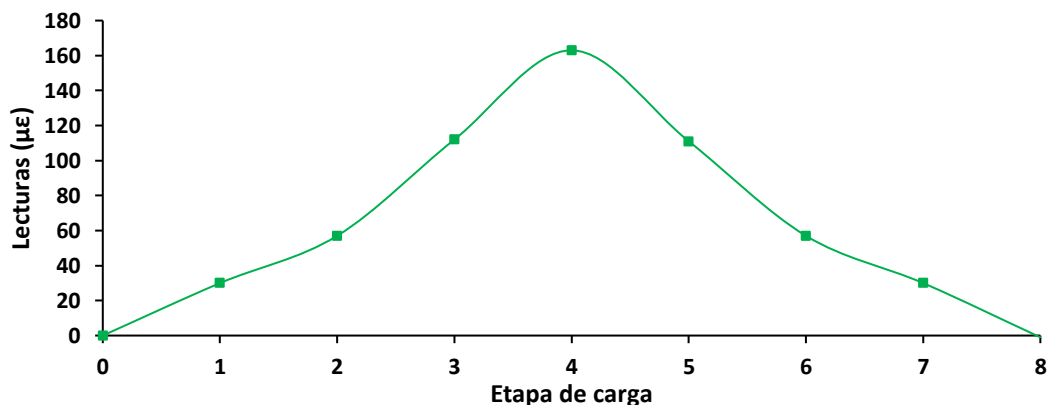


Gráfico 5.3.2 Lecturas obtenidas por los DE para la barra Tipo 01 cara superior

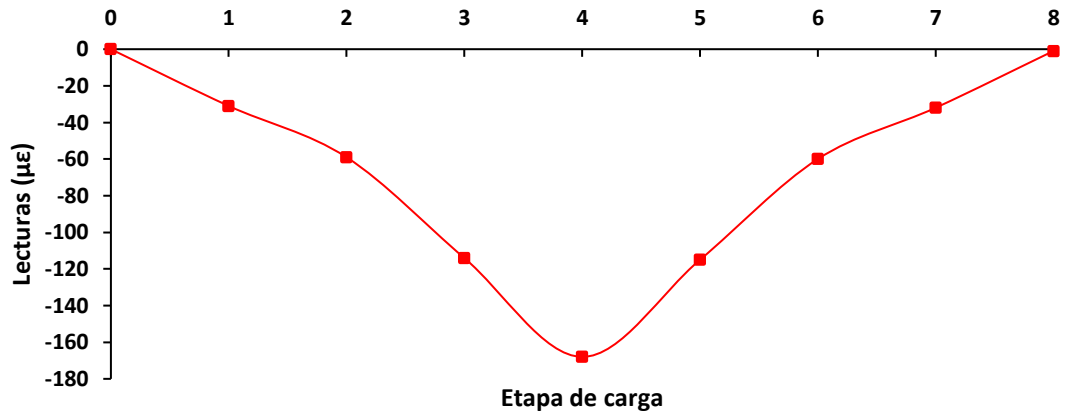


Gráfico 5.3.3 Lecturas obtenidas por los DE para la barra Tipo 01 cara inferior

b) Información capturada por los sensores de cuerda vibrante

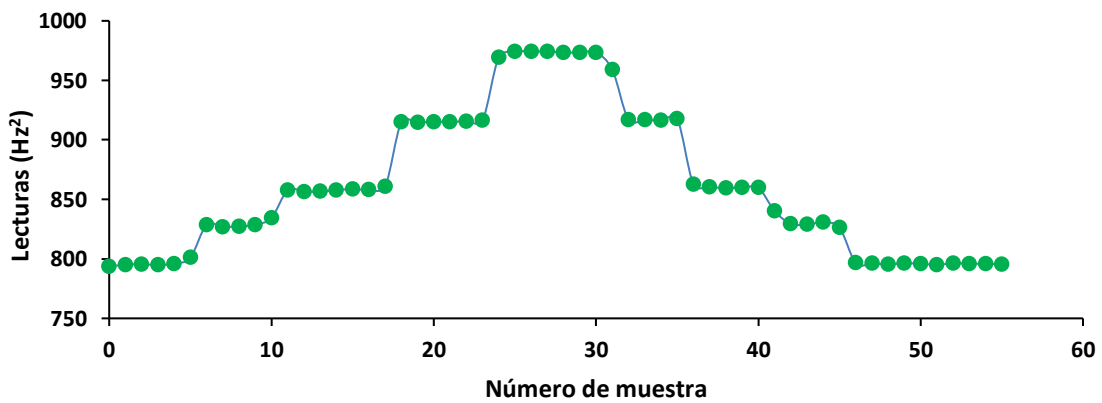


Gráfico 5.3.4 Lecturas obtenidas por los SCV para la barra Tipo 01 cara superior

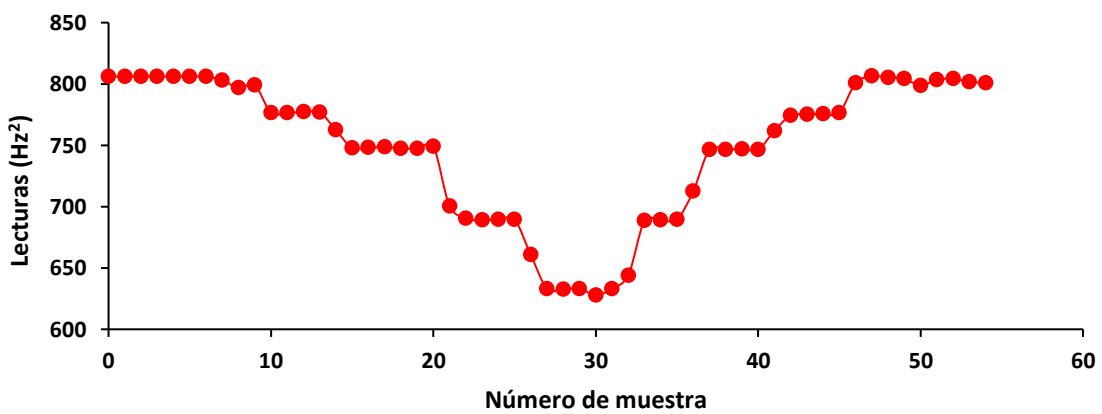


Gráfico 5.3.5 Lecturas obtenidas por los SCV para la barra Tipo 01 cara inferior

Valores promedio de las lecturas de los sensores

En las gráficas anteriores puede apreciarse un comportamiento similar para los dos sensores, donde cada escalón (en donde el tiempo sigue y el parámetro medido por el sensor se mantiene constante) corresponde a una etapa de carga.

Solamente con observar dichas gráficas, se puede notar la estabilidad de las lecturas de los SCV para este experimento, sin embargo, existen etapas de carga en donde el parámetro monitoreado por cada SCV (Hz^2) varia, por lo cual se decidió realizar un promedio aritmético de las lecturas para esa etapa de carga, en el caso de los DE solo se tomó la lectura arrojada por el P3 para cada etapa de carga, por lo cual no fue necesario realizar promedios.

Dichos promedios aritméticos se muestran a continuación:

Tabla 5.3.2 Promedio de las lecturas de los sensores en ambas caras (Barra tipo 01)

Deformímetros Extensométricos		Lecturas SCV	
Superior	Inferior	Superior	Inferior
($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(Hz^2)	(Hz^2)
0	0	794.992	794.992
30	-31	827.808	827.808
57	-59	857.512	857.512
112	-114	915.328	915.328
163	-168	973.847	973.847
111	-115	916.868	916.868
57	-60	859.833	859.833
30	-32	829.660	829.660
-1	-1	795.864	795.864

Para poder obtener la deformación, antes se debe ajustar a cero los valores promedio mostrados en las dos tablas anteriores, para ello solamente se restó el valor inicial de cada sensor.

Tabla 5.3.3 Promedio de las lecturas de los sensores ajustados a cero (Barra tipo 01)

Deformímetros Extensométricos		Lecturas SCV	
Superior	Inferior	Superior	Inferior
($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(Hz ²)	(Hz ²)
0	0	0.000	0.000
30	-31	32.815	-27.785
57	-59	62.520	-56.507
112	-114	120.336	-115.015
163	-168	178.855	-172.611
111	-115	121.876	-115.505
57	-60	64.841	-57.920
30	-32	34.668	-29.155
-1	-1	0.872	0.805

Finalmente se multiplica cada valor ajustado a cero por la respectiva constante o factor de galga de cada sensor (tabla 5.4).

Tabla 5.3.4 Valores de deformación reportados por los sensores (Barra tipo 01)

Deformímetros Extensométricos		Lecturas SCV	
Superior	Inferior	Superior	Inferior
($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)
0	0	0.000	0.000
30	-31	133.297	-112.863
57	-59	253.955	-229.530
112	-114	488.806	-467.191
163	-168	726.508	-701.146
111	-115	495.058	-469.181
57	-60	263.382	-235.271
30	-32	140.821	-118.428
-1	-1	3.542	3.270

De la tabla 5.3.4 mostrada anteriormente se graficaron los valores de deformación para poder realizar una comparación (gráfico 5.3.6).

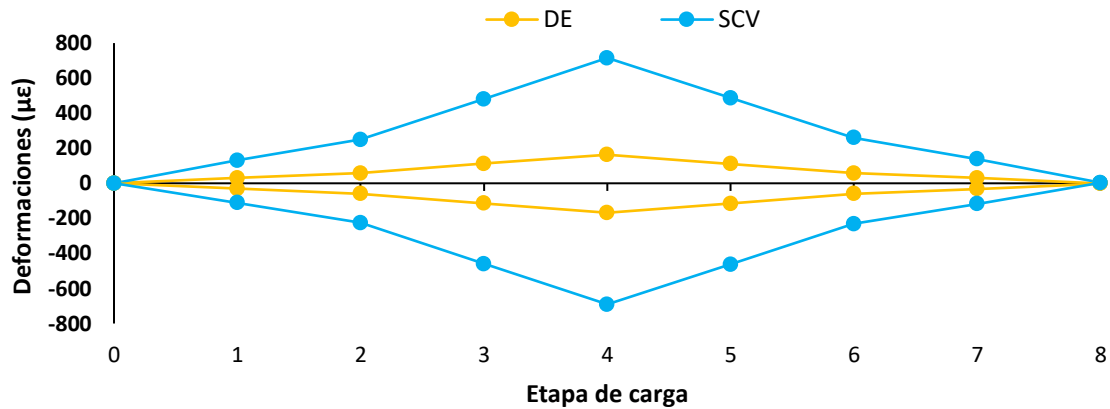


Gráfico 5.3.6 Comparación de deformaciones obtenidas por los sensores (Barra tipo 01)

Hasta este punto ya se han obtenido las deformaciones reportadas por cada instrumento de medición, pero es importante mencionar que cada instrumento reporta la deformación que ocurre a nivel de su eje longitudinal, tal como se muestra en la figura 5.3.10.

INTERPOLACIÓN DE RESULTADOS

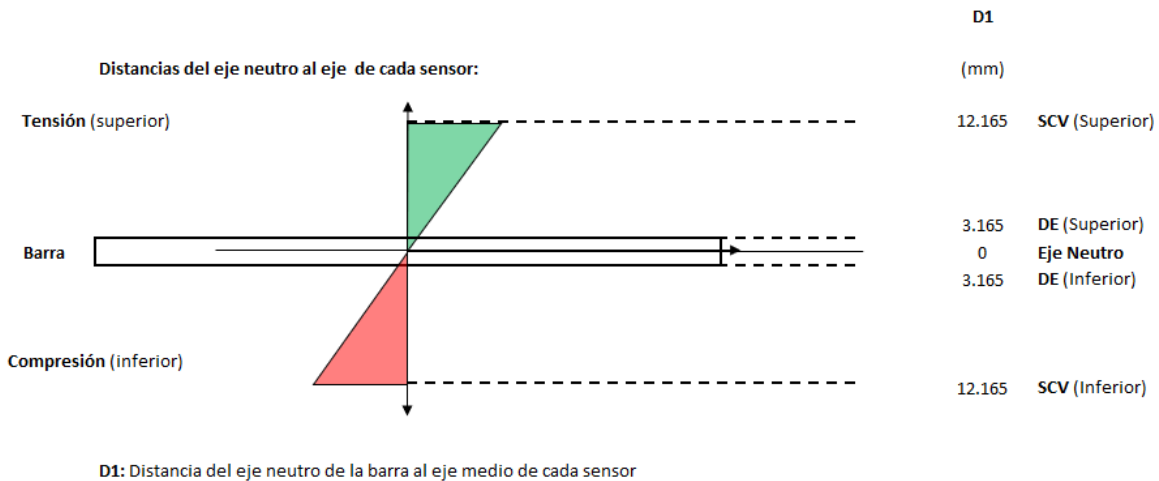


Figura 5.3.10 Esquema para realizar la interpolación de resultados, donde con líneas punteadas se muestran los niveles de los ejes de cada sensor la barra metálica Tipo 01

Por lo cuál se propuso realizar una interpolación lineal de los resultados obtenidos por cada sensor para obtener la deformación a la altura de la superficie de la barra, ya sea en las fibras superiores o inferiores. Dado que los DE se encuentran adheridos a la superficie de la barra, no se tendrán que interpolar los resultados obtenidos por este sensor.

Para realizar la interpolación se siguieron las teorías de elasticidad de los materiales y se supuso un comportamiento lineal de las deformaciones ocurridas en la sección transversal de la barra. Por lo cual se usó el teorema de semejanza de triángulos para determinar las deformaciones a la cara superior e inferior de la barra.

Debido a esto, para obtener las deformaciones se hizo uso de la ecuación 5.1 la cual se muestra a continuación:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_i}{d_i} \cdot d \quad (5.3.1)$$

Donde:

ε Deformación en la superficie de la barra

ε_i Deformación reportada por el sensor

d_i Distancia al eje neutro del sensor en cuestión

d Distancia del eje neutro a la fibra superior o inferior, es decir la mitad del espesor de la barra.

Los valores obtenidos al aplicar la ecuación 5.1 se presentan a continuación:

Tabla 5.3.7 Deformaciones interpoladas a la superficie de la barra tipo 01

Deformímetros Extensométricos		Sensores de Cuerda Vibrante	
Superior	Inferior	Superior	Inferior
($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)
0	0	0	0
30	-31	34.150	-28.915
57	-59	65.063	-58.805
112	-114	125.231	-119.694
163	-168	186.130	-179.632
111	-115	126.833	-120.203
57	-60	67.478	-60.276
30	-32	36.078	-30.341
-1	-1	0.907	0.838

Al graficar los valores de la tabla 5.3.7 resulta el gráfico 5.3.7 en el cual podemos observar que los valores reportados entre los dos tipos de sensores son casi idénticos, también se puede apreciar una simetría de la cara superior con la inferior y que el sensor se comporta de manera idéntica cuando se carga la barra y cuando se descarga.

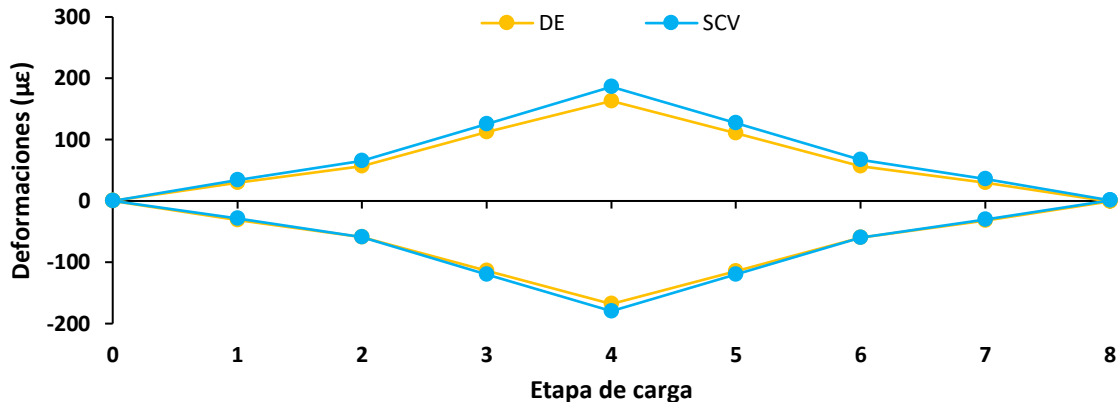


Gráfico 5.3.7 Comparación de las deformaciones obtenidas para la cara superior e inferior de la barra.

En el siguiente apartado, se obtendrán los esfuerzos teóricos que ocurrieron en los puntos de interés, los cuales usaremos para obtener el módulo de elasticidad de la barra y compáralo con el módulo teórico.

5.3.1.4 Modelo analítico de la barra Tipo 01

- Geometría del experimento

La sección transversal de la barra de acero tiene forma rectangular de dimensiones 0.633 cm x 3.14 cm.

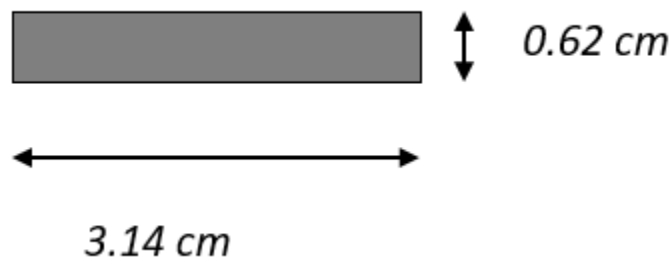


Figura 5.3.11 Sección transversal de la barra metálica Tipo 01

La idealización del modelo se presenta a continuación, en donde se indica el extremo empotrado, el punto de aplicación de carga y la sección de interés que se encuentra a 20 (cm) del empotramiento.

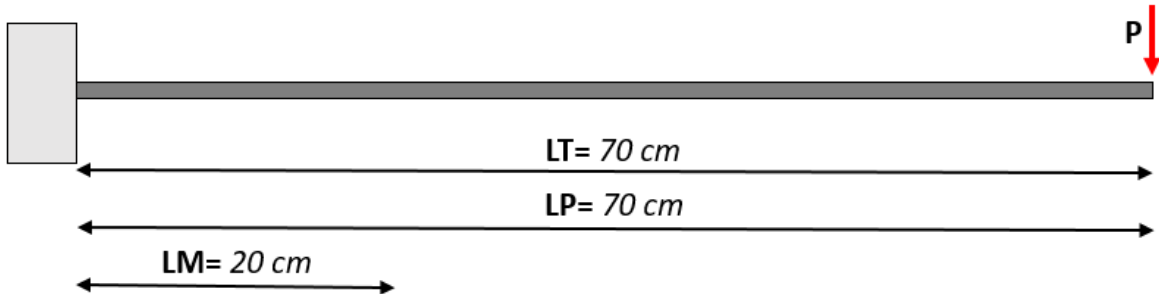


Figura 5.3.12 Modelo idealizado de la barra metálica

Dentro de la sección de interés, se pretende comparar las deformaciones teóricas con las deformaciones obtenidas de forma experimental mediante los SFO, CV y los BDI. A continuación, se muestran los puntos de interés, los cuales están situados a 20 cm del empotramiento tanto en la parte superior de la barra como en la inferior.

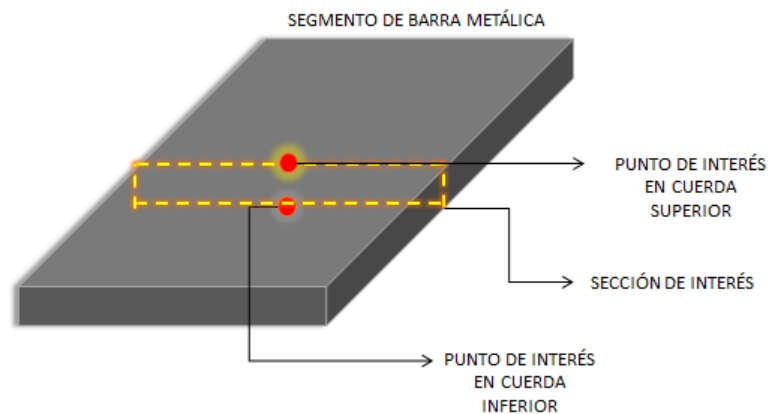


Figura 5.3.13 Puntos de interés

Por lo cual se describirá el procedimiento para obtener dichas deformaciones.

Partiendo de la Ley de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.1)$$

Donde:

- E Es el módulo de elasticidad del material, en nuestro caso lo consideraremos como 2.04×10^6 (kgf/cm²).
- σ Es el esfuerzo normal en un punto, en nuestro caso serán los puntos de interés antes mencionados.
- ε Es la deformación unitaria en un punto, para nuestro caso serán los puntos de interés antes mencionados.

La deformación unitaria será el principal parámetro de estudio, por lo cual despejando de la ecuación 1.1 Se obtiene ε .

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (5.3.1)$$

El módulo de elasticidad es una propiedad del material, por lo que es un dato con el que se cuenta. El esfuerzo normal puede ser determinado a partir de la fórmula de la escuadría, la cual se presenta a continuación.

$$\sigma = \frac{M}{I}y \quad (5.3.2)$$

Donde:

- σ Es el esfuerzo normal en un punto, en este caso serán los puntos de interés antes mencionados.
- M Es el momento flexionante que actúa en la sección de interés.
- I Es el momento de inercia de la sección transversal de la barra.
- y Es la distancia ortogonal desde el eje neutro hasta el punto de interés, en nuestro caso será equivalente a la mitad del espesor de la barra 0.317 cm.

Para obtener el momento de inercia de la barra se usa la ecuación 5.3.2:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (5.3.3)$$

Donde:

- b Es el ancho de la barra, 3.14 cm.
- h es el espesor de la barra, 0.633 cm.

Sustituyendo los valores en la ecuación 5.3.3, se obtiene:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{3.14cm * (0.633cm)^3}{12} = 0.066 cm^4$$

Ahora se procede a obtener el momento que actúa en la sección de interés, para ello se obtuvo la ecuación de momento de la barra y las reacciones en el apoyo.

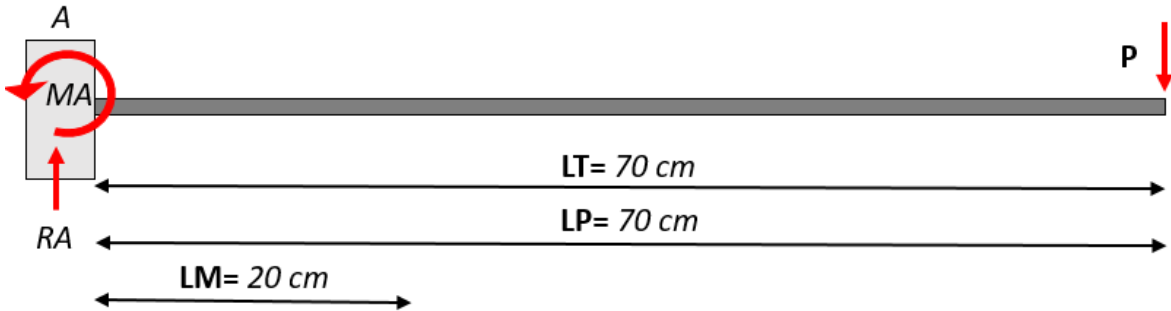


Figura 5.3.13 Reacciones en el apoyo para la barra tipo 01

$$\sum M_A = M_A - P(L_P) = 0$$

$$M_A = PL_P$$

$$R_A = P$$

Una vez obtenidos los valores de las reacciones en el apoyo, se continúa con la obtención de la ecuación de momento.

Para: $0 \leq x \leq L_P$

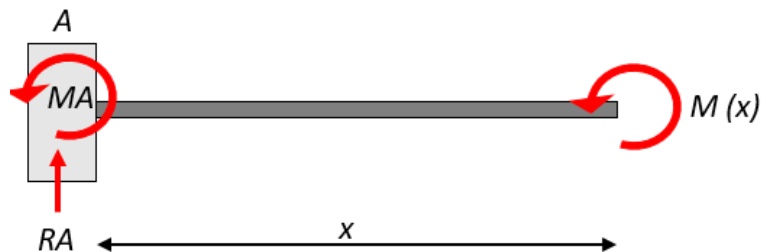


Figura 5.3.14 Primer segmento de barra para obtener ecuación de momento

$$M(x) + M_A - R_A x = 0 = 0$$

Despejando $M(x)$ y sustituyendo las reacciones en el apoyo se obtiene la ecuación 5.3.4:

$$M(x) = R_A x - M_A = Px - PL_p = P(x - L_p) \quad (5.3.4)$$

Como siguiente paso, se obtiene el momento en la sección de interés, es decir, a 20 cm del apoyo. El desarrollo que se presenta a continuación será desde 0 hasta una carga de 1.5247 (kgf).

Tabla 5.3.8 Etapas de carga (Barra tipo 01)

Etapa de carga	Carga [P] (kgf)
0	0
1	0.285
2	0.5342
3	1.0261
4	1.5247
5	1.0261
6	0.5342
7	0.285
8	0

Al sustituir los valores de P en la ecuación 5.3.4 se obtienen los valores del momento flexionante para cada etapa de carga.

Tabla 5.3.9 Valores de momento en la sección de interés y para cada etapa de carga (Barra tipo 01)

Etapa de carga	Carga [P] (kgf)	Momento [M] (kgf*cm)
0	0	0
1	0.285	14.25
2	0.5342	26.71
3	1.0261	51.305
4	1.5247	76.235
5	1.0261	51.305
6	0.5342	26.71
7	0.285	14.25
8	0	0

Posteriormente con la fórmula de la escuadría se obtienen los valores de esfuerzo para cada etapa de carga.

$$\sigma = \frac{M}{I}y$$

Tabla 5.3.10 Esfuerzo normal a lo largo de la barra y para las cinco etapas de carga (Barra tipo 01)

Etapa de carga	Carga [P]	Momento [M]	Esfuerzo [σ]
	(kgf)	(kgf*cm)	(kgf/cm2)
0	0	0	0
1	0.285	14.25	68.3352273
2	0.5342	26.71	128.086591
3	1.0261	51.305	246.030795
4	1.5247	76.235	365.581477
5	1.0261	51.305	246.030795
6	0.5342	26.71	128.086591
7	0.285	14.25	68.3352273
8	0	0	0

Finalmente, a partir de la Ley de Hooke, se obtienen las deformaciones unitarias teóricas para cada esfuerzo normal.

Tabla 5.3.11 Valores absolutos teóricos de deformación en los puntos de interés (Barra tipo 01)

Etapa de carga	Carga [P]	Momento [M]	Esfuerzo [σ]	Deformación [ε]
	(kgf)	(kgf*cm)	(kgf/cm2)	(με)
0	0	0	0	0
1	0.28	14.25	68.33	33.49
2	0.53	26.71	128.08	62.78
3	1.02	51.30	246.03	120.60
4	1.52	76.23	365.58	179.20
5	1.02	51.30	246.03	120.60
6	0.53	26.71	128.08	62.78
7	0.28	14.25	68.33	33.49
8	0	0	0	0

Para comprobar los resultados, se puede obtener el módulo de elasticidad a partir de los valores obtenidos de esfuerzo y de deformación.

Tabla 5.3.12 resumen de esfuerzos y deformaciones obtenidas para el punto de interés (Barra tipo 01)

Etapa de carga	Esfuerzo [σ]	Deformación [ε]
	(kgf/cm ²)	(με)
0	0	0
1	68.3352273	33.498
2	128.086591	62.788
3	246.030795	120.603
4	365.581477	179.207
5	246.030795	120.603
6	128.086591	62.788
7	68.3352273	33.498
8	0	0

La relación de esfuerzo entre deformación es el módulo de elasticidad, por lo cual para los datos obtenidos se usó la ecuación 5.3.5 para obtener el valor de la pendiente.

$$m = \frac{\sum xy - \frac{\sum x * \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad (5.3.5)$$

Donde:

- x Es una microdeformación
- y Es el esfuerzo normal
- n Es número de muestras
- m Es el módulo de elasticidad E

Calculando los parámetros necesarios para la obtención del módulo de elasticidad, en donde los valores de x corresponden a los esfuerzos y los valores y a las deformaciones se obtiene:

$$\Sigma xy = 145522$$

$$\Sigma x = 612.984$$

$$\Sigma y = 1250$$

$$\Sigma x^2 = 71334$$

Al sustituir los valores correspondientes en la ecuación 5.3.5 se obtiene el valor del módulo de elasticidad.

$$m = E = 2.04 * 10^6 \frac{kgf}{cm^2}$$

Modelo analítico con un programa de análisis estructural

Para complementar el estudio teórico se realizaron dos modelos analíticos en un programa de análisis estructural, los modelos se presentan a continuación:

El primer modelo consiste en un elemento barra al cual se le dieron las condiciones necesarias para representar el experimento real.

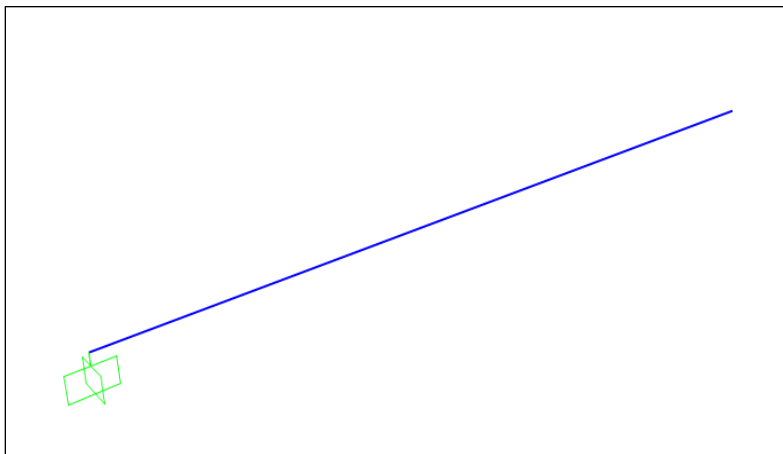


Figura 5.3.15 Modelo analítico del experimento

A continuación, se indica el proceso que se siguió para asignar dichas condiciones a la barra.

1. El primer paso fue definir la geometría del sistema.
2. Se trazó un elemento barra con una longitud de 70 (cm), porque esa es la longitud de la barra real.

3. En el extremo izquierdo colocamos una restricción de empotramiento.
4. A un nodo a 23 (cm) del extremo empotrado ya que es el lugar donde se ubica la sección de interés.
5. Por último, se asignaron las dimensiones de la sección transversal.

Se define una nueva sección en el botón de "section designer" (figura 5.3.16).

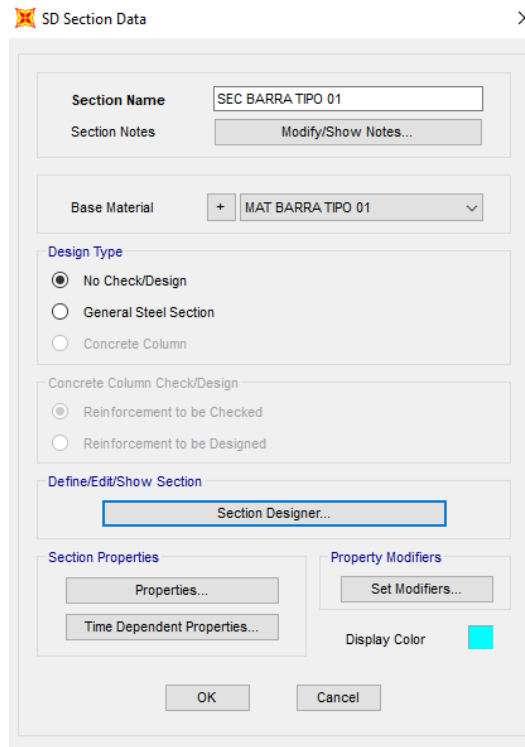


Figura 5.3.16 Venta para abrir "Section designer"

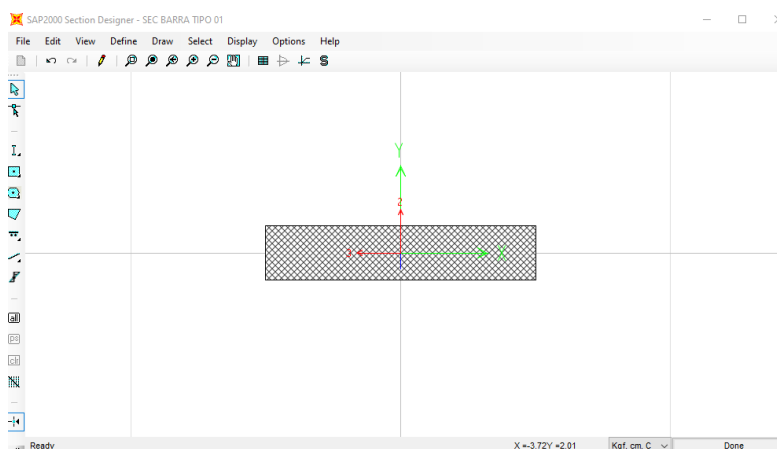


Figura 5.3.17 Geometría de la sección transversal de la barra Tipo 01

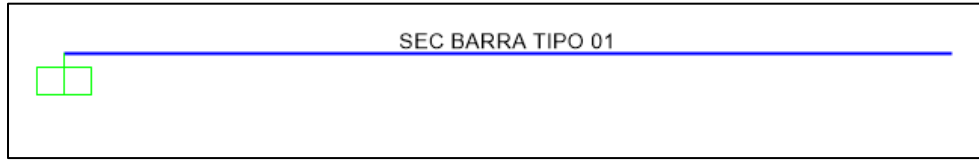


Figura 5.3.18 Sección transversal asignada a la barra

6. Como siguiente paso se define el material de la barra, en este caso es acero al cuál se le dieron los parámetros de un módulo de elasticidad de 2040000 (kgf/cm²) y un peso por unidad de volumen igual a cero debido a que los sensores no tomarán en cuenta el peso propio de la barra ni el de los sensores.

A screenshot of a software dialog box titled 'Material Property Data'. The dialog is divided into several sections: 'General Data' with fields for 'Material Name and Display Color' (MAT BARRA TIPO 01), 'Material Type' (Steel), 'Material Grade', and 'Material Notes'; 'Weight and Mass' with 'Weight per Unit Volume' (0) and 'Mass per Unit Volume' (0); 'Units' set to 'Kgf. cm. C'; 'Isotropic Property Data' with 'Modulus Of Elasticity, E' (2040000), 'Poisson, U' (0.3), 'Coefficient Of Thermal Expansion, A' (1.170E-05), and 'Shear Modulus, G' (784615.4); and 'Other Properties For Steel Materials' with 'Minimum Yield Stress, Fy' (3515.3481), 'Minimum Tensile Stress, Fu' (4569.9526), 'Expected Yield Stress, Fye' (3866.8829), and 'Expected Tensile Stress, Fue' (5026.9476). At the bottom, there is a checkbox for 'Switch To Advanced Property Display' and 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 5.3.19 Material de la barra

7. En la sección de "Load patterns" se definen cinco condiciones de carga según lo establecido en la tabla 5.3.8.

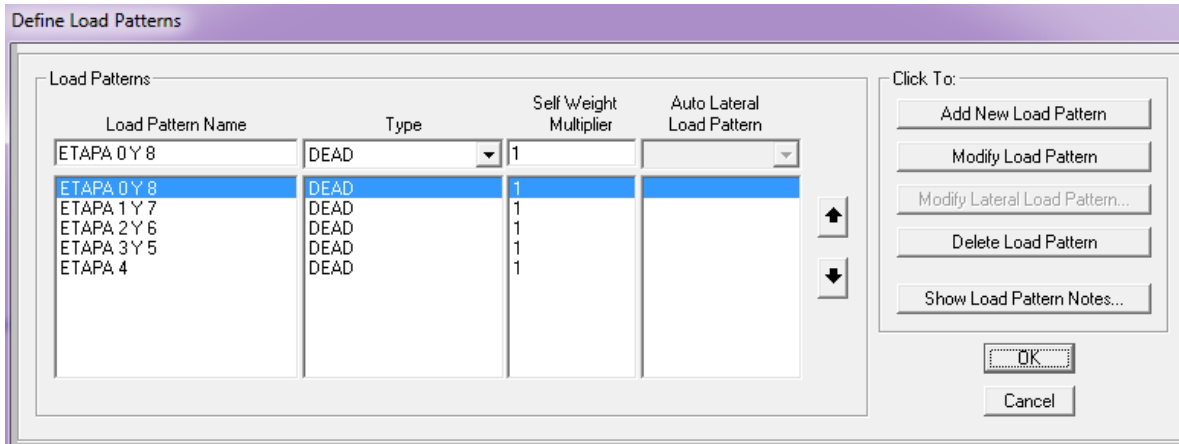


Figura 5.3.20 Etapas de carga

8.- Una vez definidas las condiciones de carga, se aplican las fuerzas P al nodo que está situado a 70 (cm) del extremo empotrado.

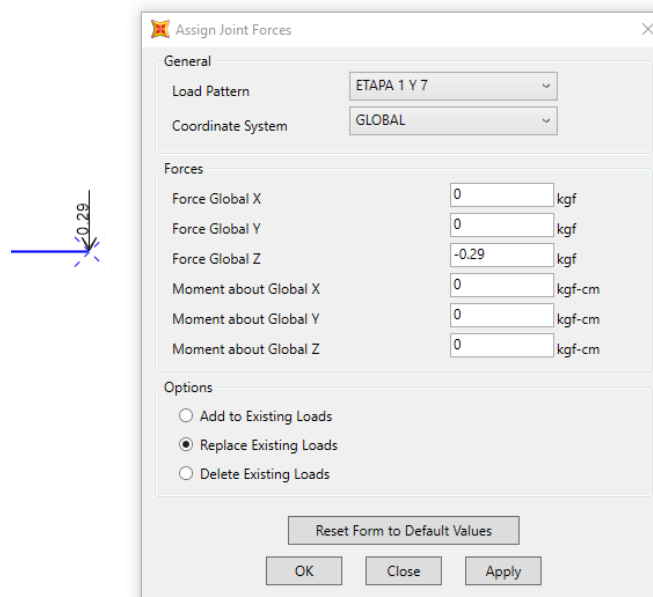


Figura 5.3.21 Asignación de la fuerza P de la etapa 1 y 7

Una vez hecho lo anterior, se corre el programa y se obtienen los siguientes resultados:

Como era de esperar, para la Etapa 0 y 8 no se tienen elementos mecánicos en la barra y por ende tampoco esfuerzos (figura 5.3.22), se debe recalcar que esta condición de carga se definió para corroborar la confiabilidad del modelo.

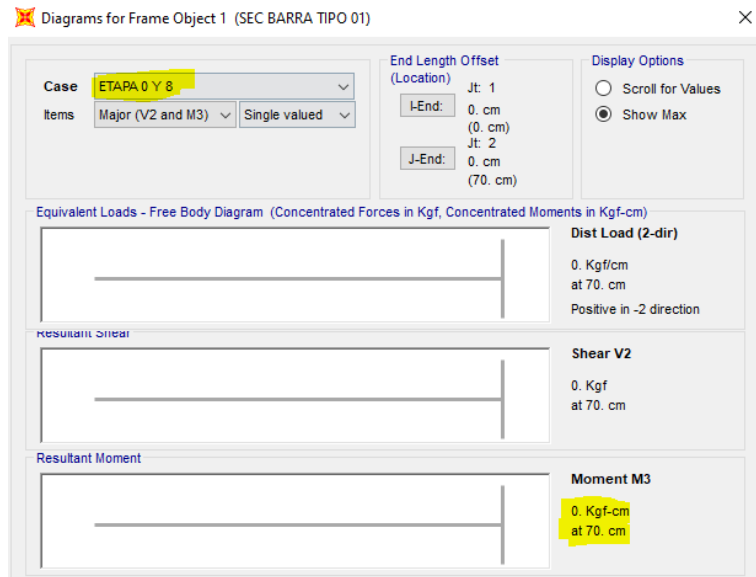


Figura 5.3.22 Diagramas de la barra para la etapa 0 y 8

En las imágenes que se muestran a continuación es posible observar las reacciones en el apoyo, así como el momento que actúa a 20 cm del extremo empotrado para las etapas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (figuras 5.3.23, 5.3.24, 5.3.25 y 5.3.26 respectivamente).

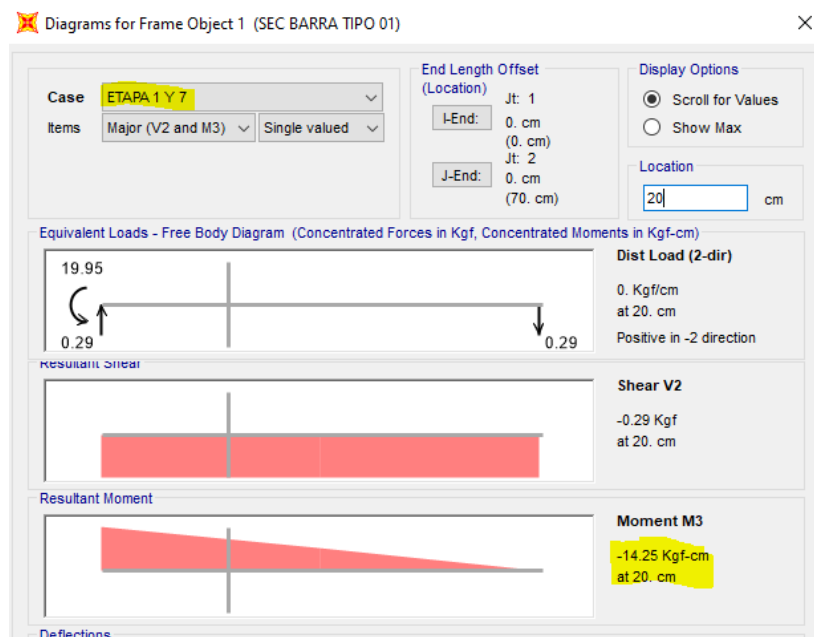


Figura 5.3.23 Diagramas de la barra para la etapa 1 y 7

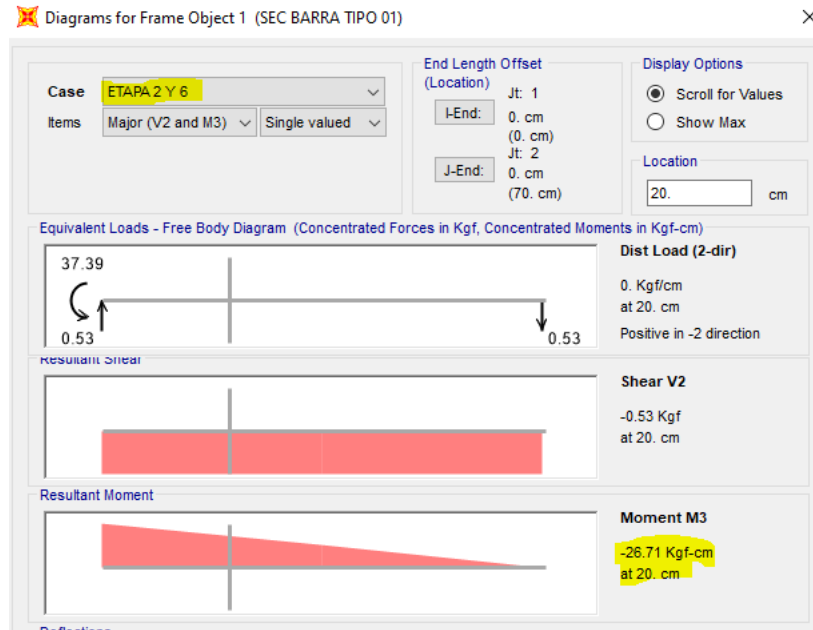


Figura 5.3.24 Diagramas de la barra para la etapa 2 y 6

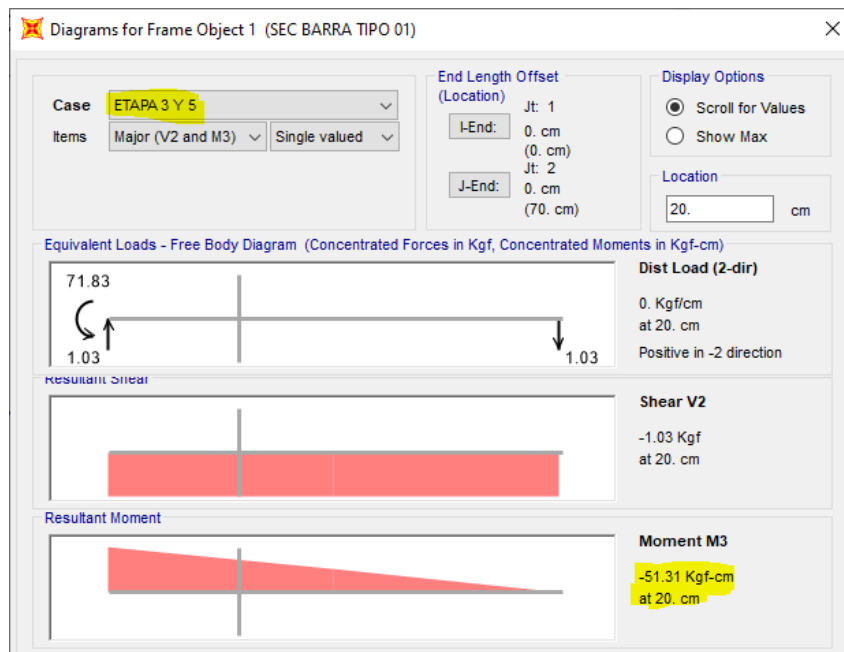


Figura 5.3.25 Diagramas de la barra para la etapa 3 y 5

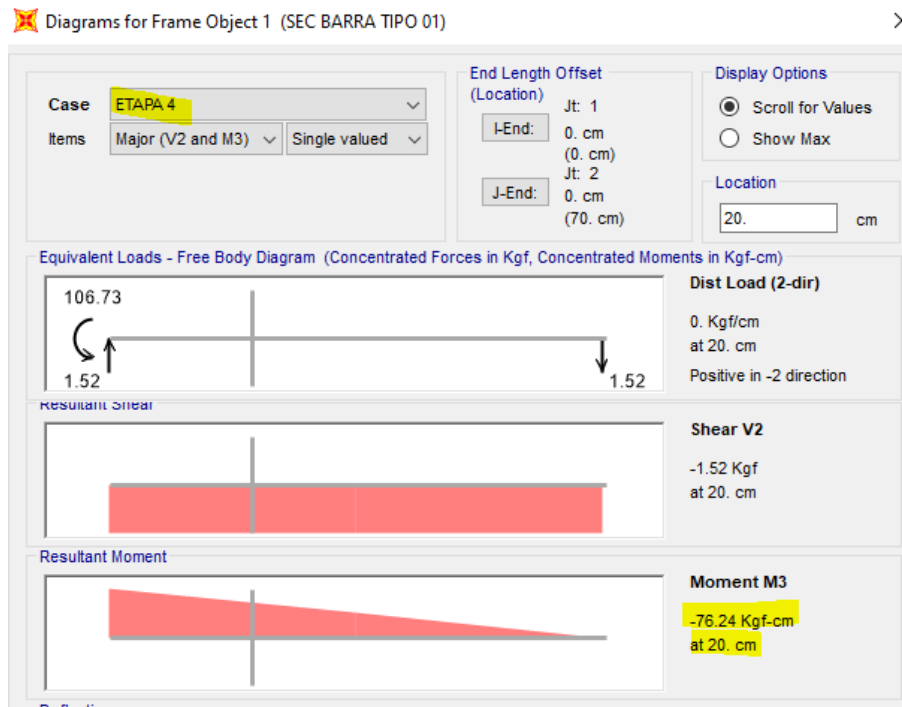


Figura 5.3.26 Diagramas de la barra para la etapa 4

A continuación, se muestra una tabla comparativa del valor del momento obtenido con el desarrollo matemático y con el programa computacional.

Tabla 5.3.15 Comparación de momentos a 20 cm del extremo empotrado

Etapa de carga	Carga [P]	Momento con el programa [M]	Momento Teórico [M]
	(kgf)	(kgf*cm)	(kgf*cm)
0	0	0	0
1	0.285	14.25	14.25
2	0.534	26.71	26.71
3	1.026	51.31	51.31
4	1.525	76.24	76.24
5	1.026	51.31	51.31
6	0.534	26.71	26.71
7	0.285	14.25	14.25
8	0	0	0

Modelo de elementos finitos con un programa de análisis estructural

Con el fin de tener una comparación más detallada, se realizó un modelo de elementos finitos en el mismo programa de análisis estructural.

El proceso de modelado se describe a continuación:

1. El primer paso fue dibujar una malla que permitiera trazar de forma fácil la barra de acero que en estudio. Teniendo en cuenta que el elemento finito tendrá dimensiones de 1 cm en dirección x, 3.14 cm en dirección y y 0.1055 cm en la dirección z (figuras 5.3.27 y 5.3.28).

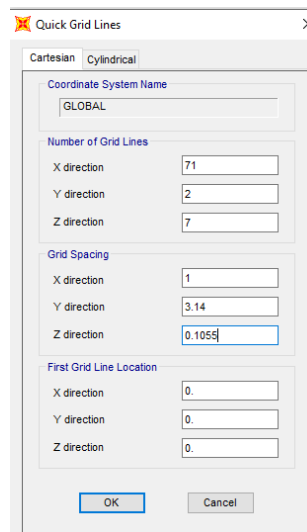


Figura 5.3.27 Datos de malla para trazar el modelo

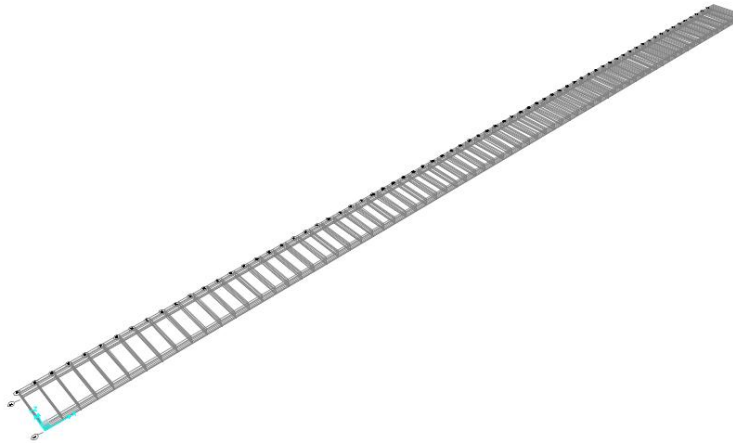


Figura 5.3.28 Malla para trazar modelo

2. El siguiente paso es trazar un elemento área como se muestra. Y en la sección de visualización se puede activar la opción de "Fill objects" para visualizarlo como se presenta en la figura 5.3.29:

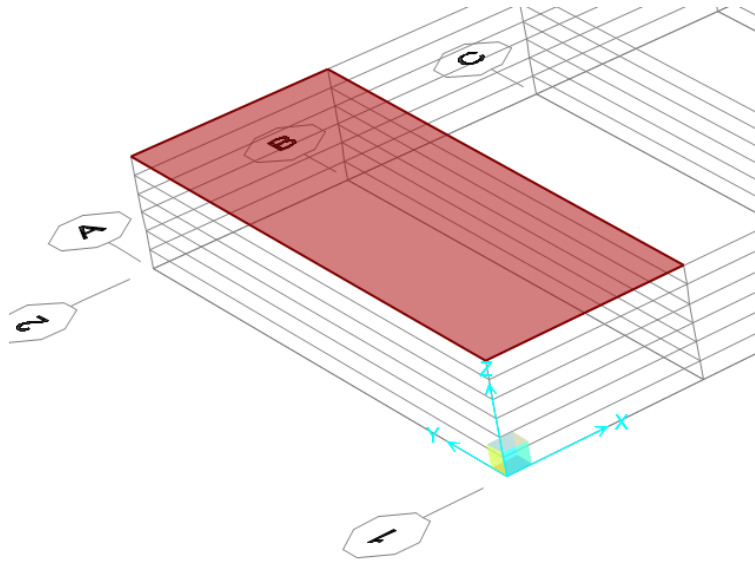


Figura 5.3.29 Trazado del elemento área

1. A continuación, con el comando "extrude áreas to solids" se convierten las áreas en sólidos (figura 5.3.30).

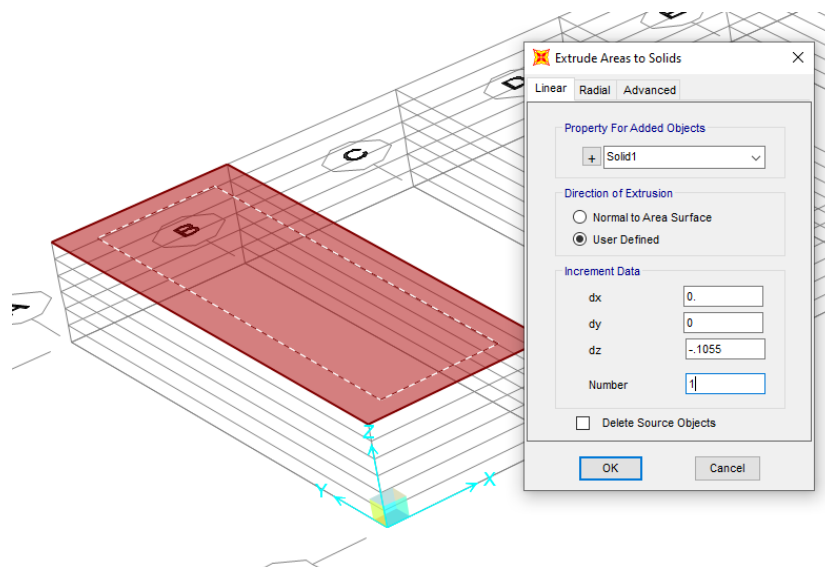


Figura 5.3.30 Extrusión de área a sólidos

2. Al elemento sólido resultante se le asigna las propiedades del material (figura 5.3.31), en este caso, se define un material con

peso propio igual a cero y un módulo de elasticidad de 2.04×10^6 (kgf/cm²)

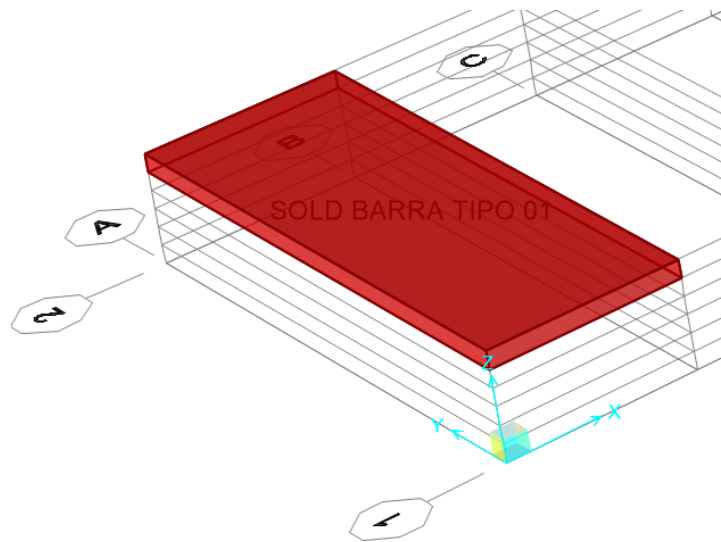


Figura 5.3.31 Sólido resultante con las propiedades de material

3. Como siguiente paso se replica el sólido las veces necesarias para darle el tamaño real de la barra (figura 5.3.32).

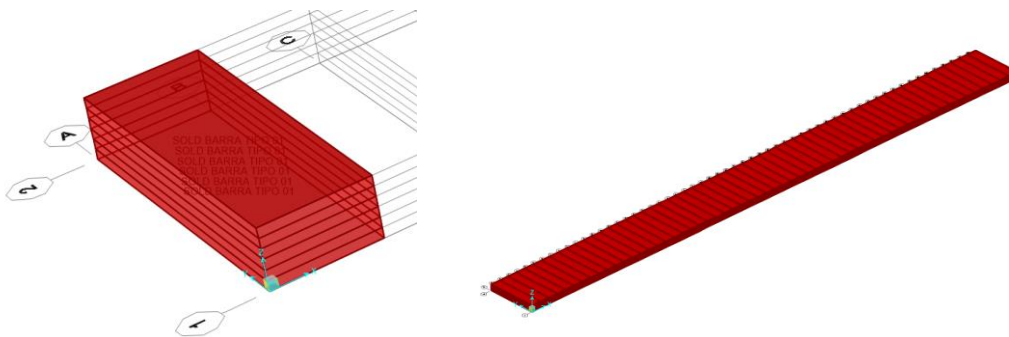


Figura 5.3.32 Elemento sólido replicado

4. El siguiente paso será asignar una condición de empotramiento, tal como se muestra en la figura 5.3.33.

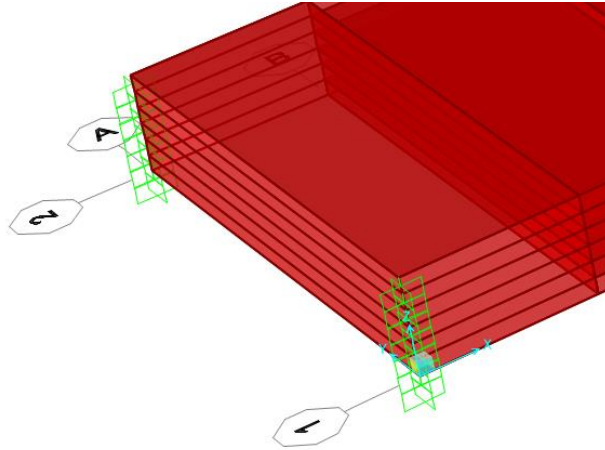


Figura 5.3.33 Empotramiento de la barra metálica

5. Después se asigna un nodo adicional a 70 (cm) del empotramiento, porque será ahí en donde se aplicarán las cargas, tal como se muestra en la figura 5.3.34.

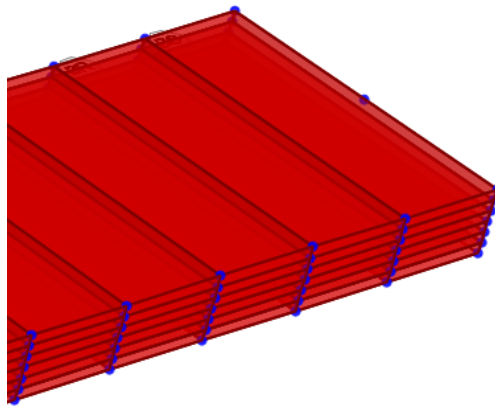


Figura 5.3.34 Nodo adicional asignado (Barra tipo 01)

6. En la sección de "Load patterns" se definen cinco condiciones de carga según lo establecido en la tabla 5.3.8.

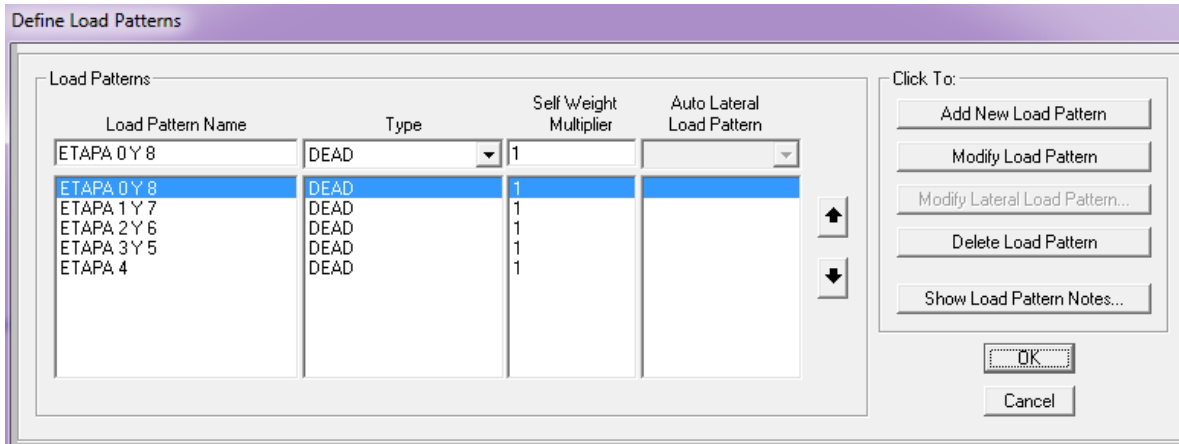


Figura 5.3.35 Etapas de carga para el modelo de elementos finitos

- Una vez definidas las condiciones de carga, se aplican las fuerzas P al nodo que está situado a 70 (cm) del extremo empotrado.
- Se procede a realizar el análisis en el programa y se presentan los valores de los esfuerzos sobre la barra (figura 5.3.36).

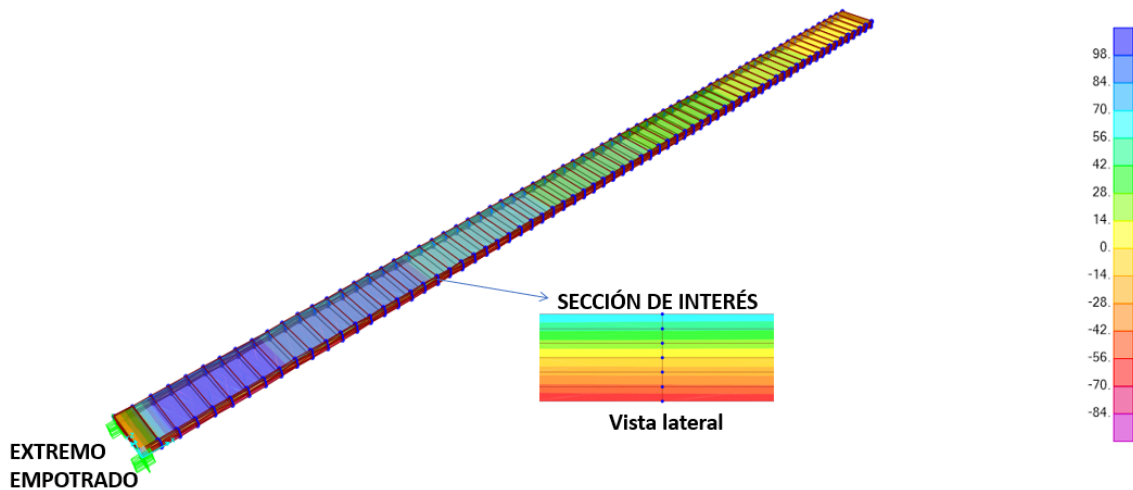


Figura 5.3.36 Esfuerzos normales para la etapa 4 además se indica la sección de interés (Barra tipo 01)

A continuación, se muestran los esfuerzos que se obtuvieron en la sección de interés:

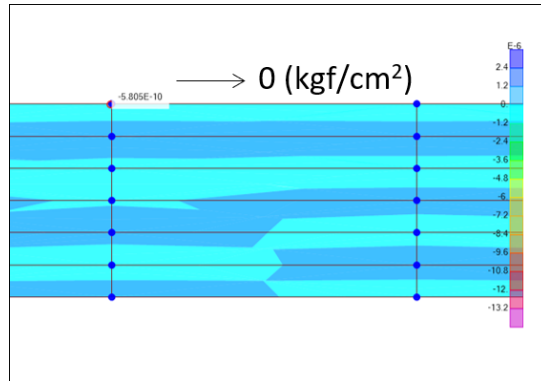


Figura 5.3.37 Valores de esfuerzo normal en la sección de interés para las etapas 0 y 8 (Barra tipo 01)

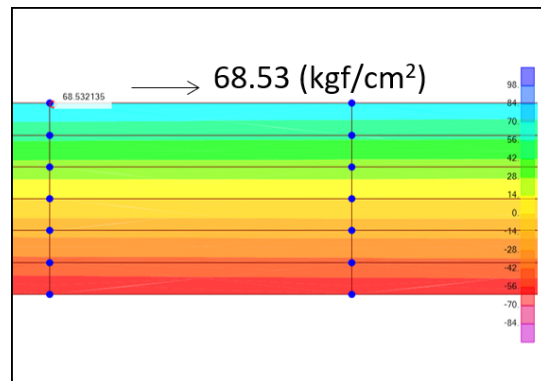


Figura 5.3.38 Valores de esfuerzo normal en la sección de interés para las etapas 1 y 7 (Barra tipo 01)

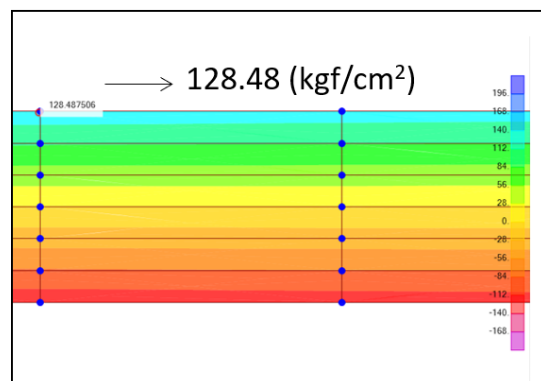


Figura 5.3.39 Valores de esfuerzo normal en la sección de interés para las etapas 2 y 6 (Barra tipo 01)

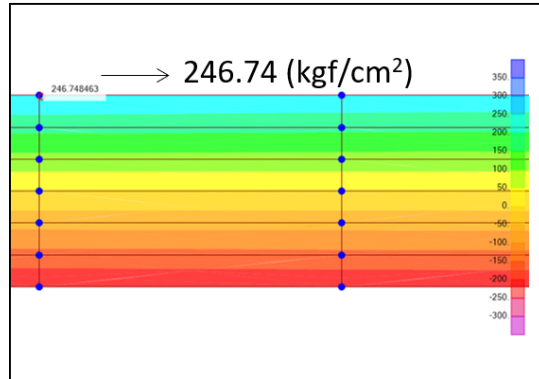


Figura 5.3.40 Valores de esfuerzo normal en la sección de interés para las etapas 3 y 5 (Barra tipo 01)

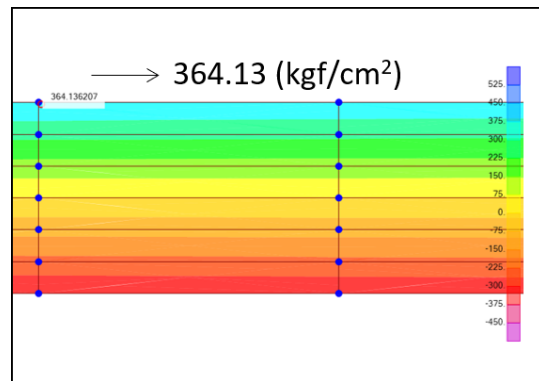


Figura 5.3.41 Valores de esfuerzo normal en la sección de interés para la etapa 4 (Barra tipo 01)

Tabla 5.3.17 Resumen de esfuerzos y deformaciones obtenidos mediante un modelo de elementos finitos (Barra tipo 01)

Etapa de carga	Carga [P]	Esfuerzo teórico $[\sigma]$	Esfuerzo elementos finitos $[\sigma]$	Deformación teórica $[\epsilon]$	Deformación elementos finitos $[\epsilon]$
	(kgf)	(kgf*cm)	(kgf*cm)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)
0	0	0	0	0	0
1	0.285	68.34	68.53	33.498	33.59
2	0.5342	128.09	128.48	62.788	62.98
3	1.0261	246.03	246.74	120.603	120.95
4	1.5247	365.58	364.13	179.207	178.5
5	1.0261	246.03	246.74	120.603	120.95
6	0.5342	128.09	128.48	62.788	62.98
7	0.285	68.34	68.53	33.498	33.59
8	0	0	0	0	0

5.3.1.5 Comparación entre resultados analíticos y experimentales de la barra Tipo 01

El principal parámetro de comparación es el módulo de elasticidad. En la siguiente tabla se presentan los valores de esfuerzo teórico y las deformaciones obtenidas mediante los métodos antes presentados.

Para poder obtener el valor del módulo de elasticidad, se realizó una regresión lineal con los valores de deformación de cada experimento y los esfuerzos teóricos.

Tabla 5.3.18 Tabla comparativa para la barra Tipo 01

Etapa de carga	Carga	Esfuerzos	Deformaciones					
			Teórica	Elementos finitos	Deformímetros Extensométricos		Sensores de Cuerda Vibrante	
	P	σ			Superior	Inferior	Superior	Inferior
	(kgf)	(kgf/cm ²)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.285	68.335	33.5	33.59	30	-31	34.15	-28.915
2	0.5342	128.087	62.79	62.98	57	-59	65.063	-58.805
3	1.0261	246.031	120.6	120.95	112	-114	125.231	-119.694
4	1.5247	365.581	179.21	178.5	163	-168	186.13	-179.632
5	1.0261	246.031	120.6	120.95	111	-115	126.833	-120.203
6	0.5342	128.087	62.79	62.98	57	-60	67.478	-60.276
7	0.285	68.335	33.5	33.59	30	-32	36.078	-30.341
8	0	0	0	0	-1	-1	0.907	0.838
Módulo de elasticidad (kgf/cm²) x10⁶			2.04	2.043	2.218	2.17	1.965	2.015
%Error			0%	0%	9%	6%	4%	1%

$$\%Error = \left| \frac{Valor\ teórico - Valor\ experimental}{Valor\ teórico} \right|$$

5.3.2 Barra Tipo 02

5.3.2.1 Descripción del experimento barra Tipo 02

El experimento que a continuación se describe se realizó con ayuda de personal del Instituto de Ingeniería.

Dicho experimento consistió en una prueba de carga de una barra metálica. La barra se colocó de forma empotrada en un extremo y a diferencia del experimento de la barra tipo 01 esta fue instrumentada con tres tipos de sensores de deformación (SCV, BDI y SFO) tanto en la parte superior como en la inferior (Figura 5.3.42 y Figura 5.3.43).



Figura 5.3.42 Barra metálica instrumentada

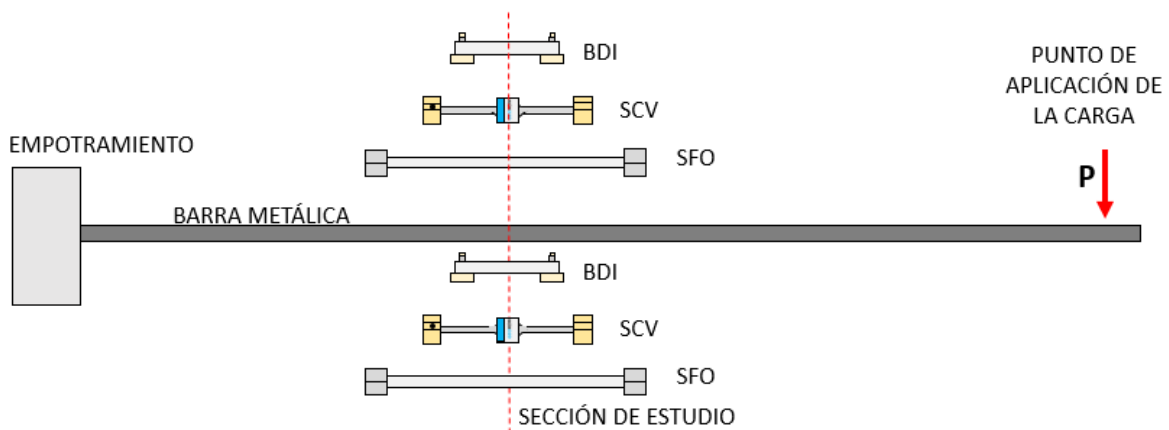


Figura 5.3.43 Esquema del experimento de la barra Tipo 02

El objetivo de la instrumentación del experimento fue el estudio del comportamiento de los sensores de deformación para poder evaluar su

desempeño al comparar las deformaciones obtenidas por los sensores y las obtenidas mediante un modelo matemático.

Las características geométricas del experimento se describen a continuación:

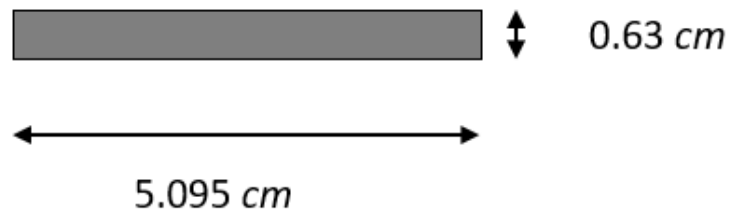


Figura 5.3.44 Sección transversal de la barra Tipo 02

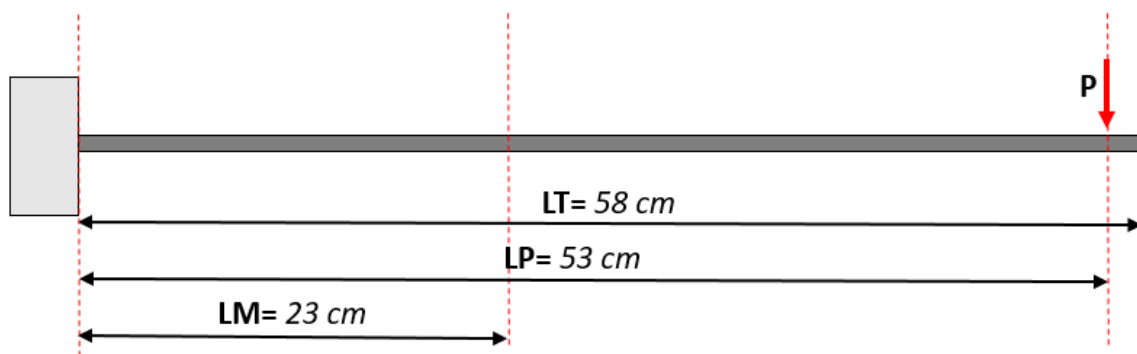


Figura 5.3.45 Corte longitudinal de la barra Tipo 02

Donde:

LM Es la distancia del empotramiento a la sección de estudio

LP Es la distancia del empotramiento al punto de aplicación de la carga

LT Es la longitud total de la barra metálica en voladizo

A la barra se le aplicaron nueve etapas de carga mostradas en la figura 5. Y Tabla 5.) en un solo punto situado a cinco centímetros del extremo no empotrado. Dichas cargas fueron aplicadas con pequeñas placas de acero cuya masa fue determinada con una balanza electrónica, teniéndose tres placas con valores de 283.7 (g), 250 (g) y 500 (g).



Figura 5.3.46 Esquema de la barra metálica deformada en las diferentes etapas de carga

Tabla 5.3.16 Etapas de carga para la barra Tipo 02

Etapa de carga	Carga [P] (kgf)
0	0
1	0.2837
2	0.5337
3	0.7837
4	1.0337
5	0.7837
6	0.5337
7	0.2837
8	0

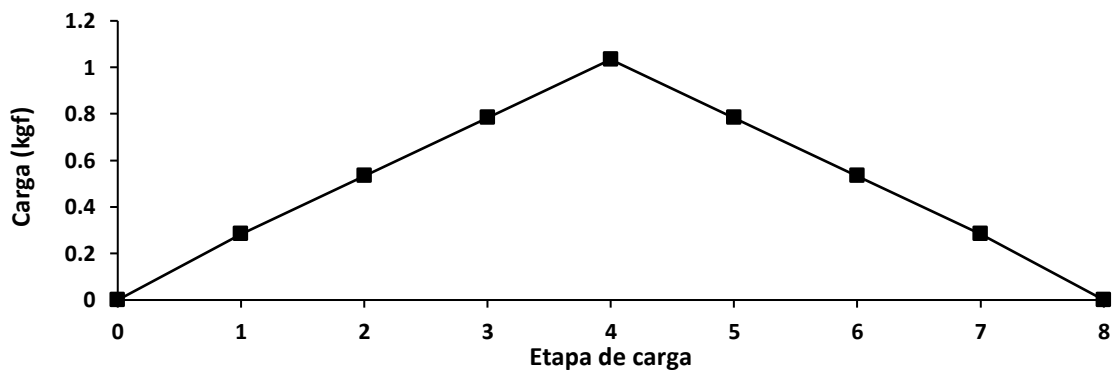


Gráfico 5.3.8 Etapas de carga para la barra Tipo 02

El experimento se realizó dentro un laboratorio y la duración de las pruebas no excedió los diez minutos, por lo que los efectos dados por el cambio de temperatura fueron despreciados.

5.3.2.2 Instrumentación barra Tipo 02

Los sensores con los que fue instrumentada la barra fueron los siguientes y su colocación puede consultarse a detalle en el Capítulo 5.1:

- a) Deformímetros (BDI)
- b) Sensor de Cuerda Vibrante (SCV)
- c) Sensor de Fibra Óptica (SFO)

Los instrumentos se instalaron para realizar una medición de la deformación en un punto localizado a 23 (cm) a partir del empotramiento de la barra, a lo que llamaremos la sección de estudio o sección de interés (Figura 5.3.47).

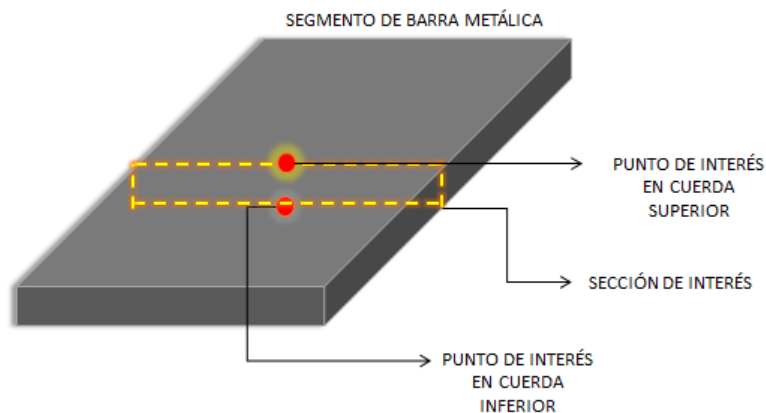


Figura 5.3.47 Puntos de interés

Con el fin de tener información de las fibras a compresión y a tensión de nuestro elemento se realizó la instalación de los instrumentos de medición en ambas caras de la barra (figura 5.3.48).

Es importante mencionar que primero se capturó la información de los sensores de las fibras a tensión (cara superior) sin montar los sensores de la cara inferior, esto para reducir la influencia del peso de los sensores sobre la barra. Después se capturo la información de la cara inferior sin los sensores de la cara superior.

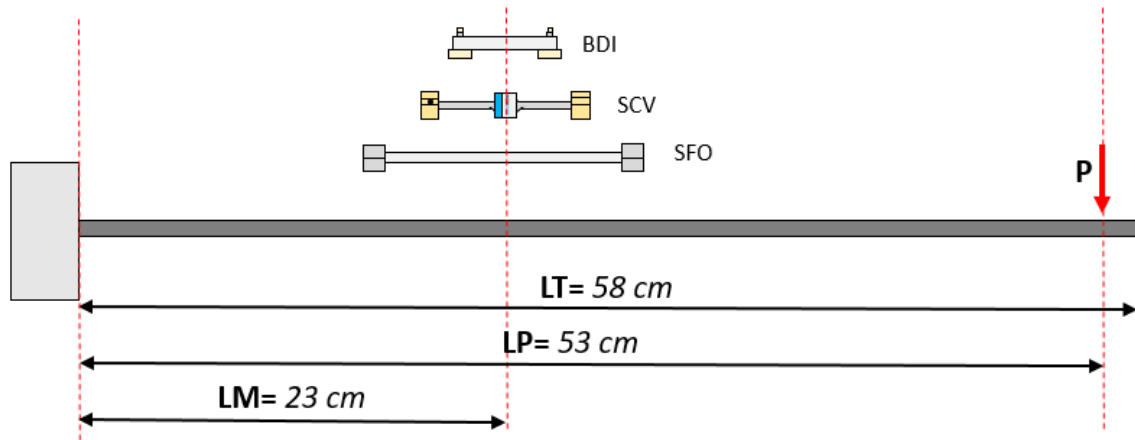


Figura 5.3.48 Localización de los sensores en la barra Tipo 02

Para fines de distinción de los instrumentos de medición, los ubicados en la cara superior fueron identificados (figura 5.3.49) con el color verde y los instrumentos ubicados en la cara inferior con el color rojo.

A continuación se muestra una imagen de como esta compuesto el sistema de medición, donde se aprecia la cara superior.



Figura 5.3.49 Instrumentación superior de la barra tipo 02, se aprecian las etiquetas verdes

5.3.2.3 Análisis e interpretación de resultados barra Tipo 02

En este apartado se muestra la información obtenida directamente de los sensores, además de las deformaciones resultantes del procesamiento de la información.

Información capturada por los sensores de deformación BDI, sensores de cuerda vibrante y sensores de fibra óptica

a) Información capturada por los sensores de deformación

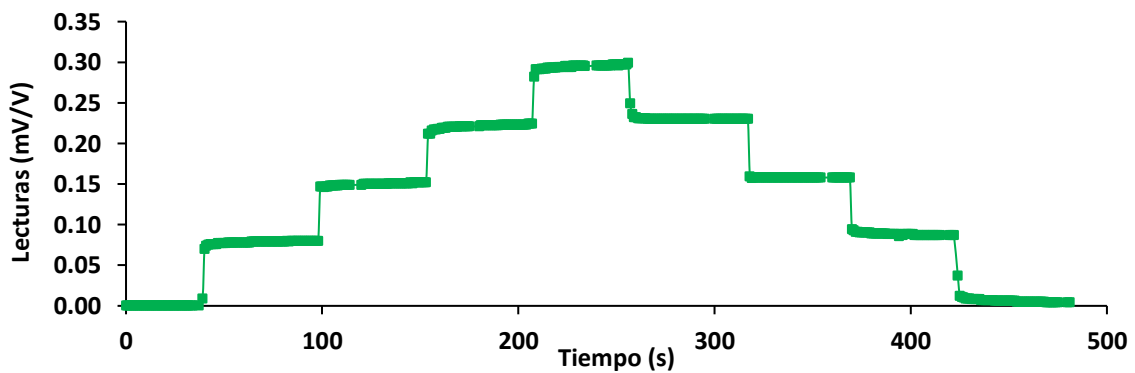


Gráfico 5.3.9 Lecturas obtenidas por los BDI para la barra Tipo 02 cara superior

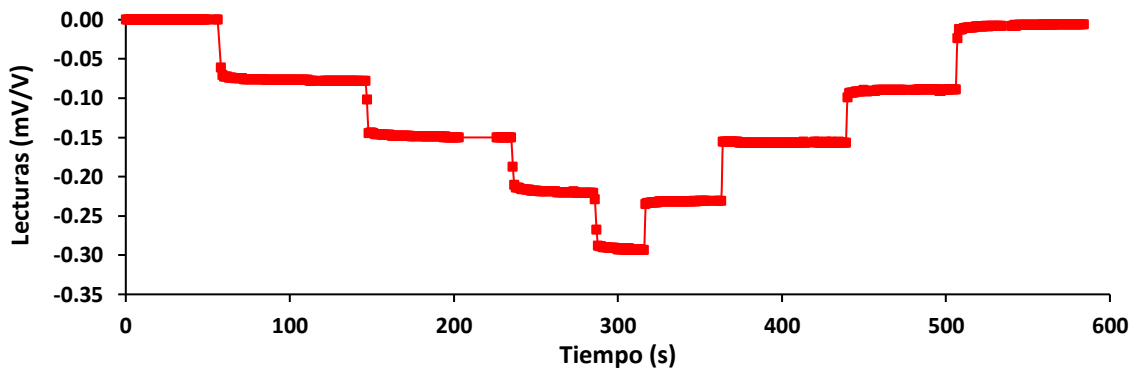


Gráfico 5.3.10 Lecturas obtenidas por los BDI para la barra Tipo 02 cara inferior

b) Información capturada por los sensores de cuerda vibrante

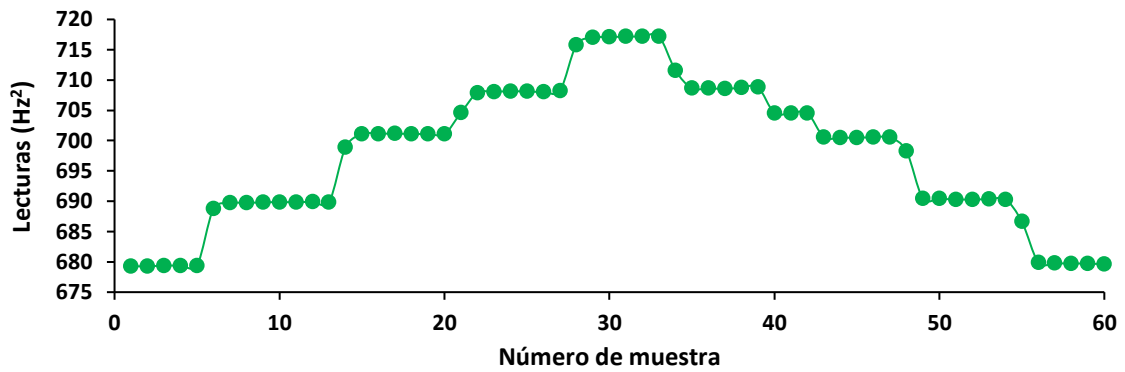


Gráfico 5.3.11 Lecturas obtenidas por los SCV para la barra Tipo 02 cara superior

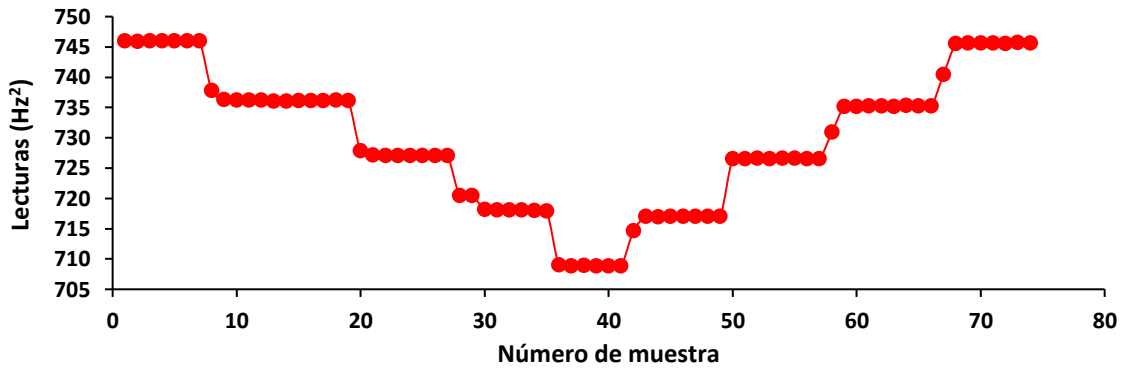


Gráfico 5.3.12 Lecturas obtenidas por los SCV para la barra Tipo 02 cara inferior

c) Información capturada por los sensores de fibra óptica

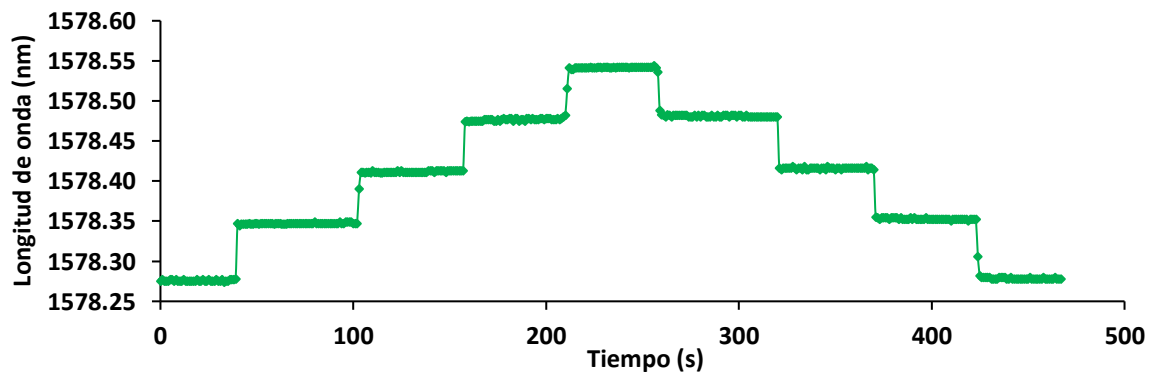


Gráfico 5.3.13 Lecturas obtenidas por los SFO para la barra Tipo 02 cara superior

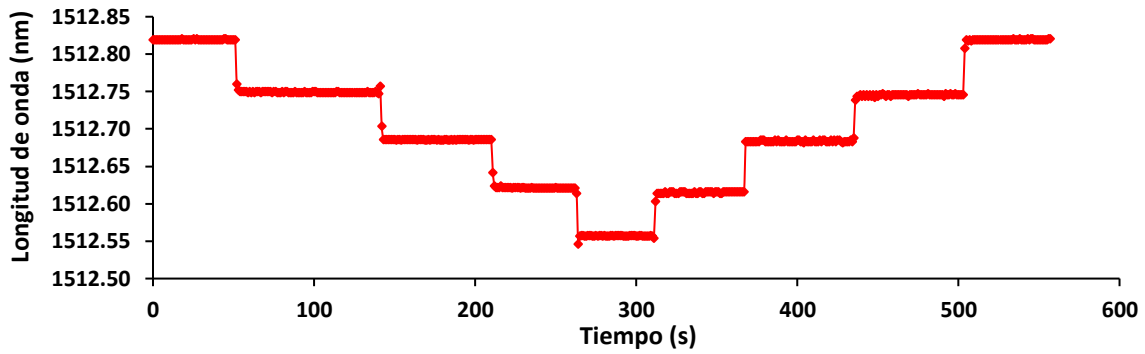


Gráfico 5.3.14 Lecturas obtenidas por los SFO para la barra Tipo 02 cara inferior

Valores promedio de las lecturas de los sensores

En las gráficas anteriores puede apreciarse un comportamiento similar para los dos sensores, donde cada escalón (en donde el tiempo sigue y el parámetro medido por el sensor se mantiene constante) corresponde a una etapa de carga.

Solamente con observar dichas gráficas, se puede notar la estabilidad de las lecturas de los sensores para este experimento, sin embargo, existen etapas de carga en donde el parámetro monitoreado por cada sensor ($\mu\text{V/V}$), frecuencia al cuadrado (Hz^2) o longitud de onda (μm) presenta una variación dado su sensibilidad, por lo cual se decidió realizar un promedio aritmético de las lecturas para esa etapa de carga.

Dichos promedios aritméticos se muestran a continuación:

Tabla 5.3.17 Promedio de las lecturas de los sensores en ambas caras (Barra tipo 02)

Lecturas BDI		Lecturas SCV		Lecturas SFO	
Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
(mV/V)	(mV/V)	(Hz ²)	(Hz ²)	[nm]	[nm]
0	0	679.342	745.925	1578.276	1512.819
0.077	-0.077	689.811	736.112	1578.347	1512.75
0.15	-0.148	701.125	727.142	1578.411	1512.686
0.221	-0.219	708.118	718.021	1578.477	1512.613
0.295	-0.294	717.132	708.832	1578.542	1512.558
0.23	-0.232	708.678	716.966	1578.481	1512.615
0.158	-0.157	700.53	726.526	1578.416	1512.684
0.088	-0.09	690.326	734.692	1578.352	1512.746
0.006	-0.007	679.748	745.567	1578.279	1512.819

Para poder obtener la deformación, antes se debe ajustar a cero los valores promedio mostrados en las dos tablas anteriores, para ello solamente se restó el valor inicial de cada sensor.

Tabla 5.3.18 Promedio de las lecturas de los sensores ajustados a cero (Barra tipo 02)

Lecturas BDI		Lecturas SCV		Lecturas SFO	
Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
(mV/V)	(mV/V)	(Hz ²)	(Hz ²)	[nm]	[nm]
0	0	0	0	0	0
0.077	-0.077	10.469	-9.813	0.071	-0.069
0.15	-0.148	21.783	-18.783	0.135	-0.133
0.221	-0.219	28.776	-27.904	0.201	-0.206
0.295	-0.294	37.79	-37.093	0.266	-0.261
0.23	-0.232	29.336	-28.959	0.205	-0.204
0.158	-0.157	21.188	-19.399	0.14	-0.135
0.088	-0.09	10.984	-11.233	0.076	-0.073
0.006	-0.007	0.406	-0.358	0.003	0

Finalmente se multiplica cada valor ajustado a cero por la respectiva constante o factor de galga de cada sensor (tabla 5.4).

Tabla 5.3.19 Valores de deformación reportados por los sensores (Barra tipo 02)

Lecturas BDI		Lecturas SCV		Lecturas SFO	
Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)
0	0	0	0	0	0
38.61	-38.265	42.528	-39.86	54.954	-53.077
74.81	-74.093	88.483	-76.296	104.544	-102.553
110.571	-109.489	116.888	-113.346	154.742	-158.537
147.43	-147	153.503	-150.675	204.611	-201.124
115.105	-115.923	119.163	-117.634	158.154	-156.833
78.989	-78.308	86.066	-78.801	107.84	-104.172
44.011	-45.177	44.617	-45.63	59.15	-56.275
2.898	-3.532	1.649	-1.457	2.378	0.174

De la tabla 5.3.19 mostrada anteriormente se graficaron los valores de deformación para poder realizar una comparación (gráfico 5.3.15)

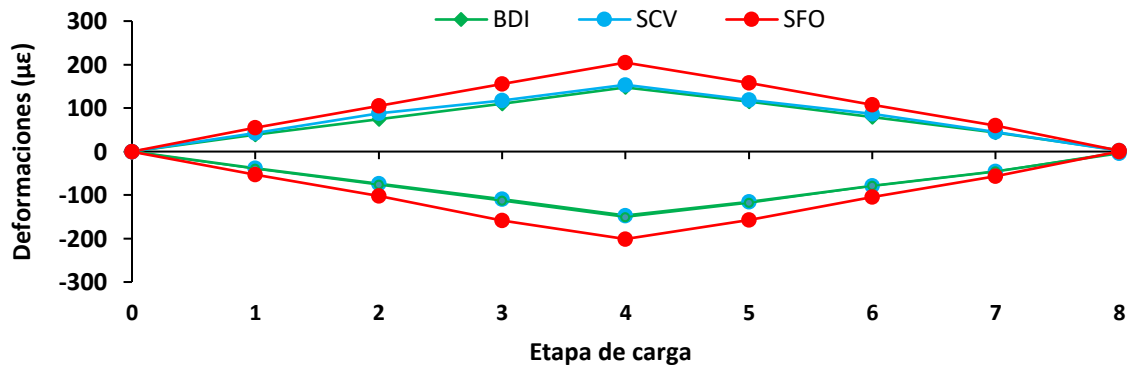


Gráfico 5.3.15 Comparación de deformaciones obtenidas por todos los sensores (Barra tipo 02)

Hasta este punto ya se han obtenido las deformaciones reportadas por cada instrumento de medición, pero es importante mencionar que cada instrumento reporto la deformación que ocurre a nivel de su eje longitudinal, tal como se muestra en la figura 5.3.10.

INTERPOLACIÓN DE RESULTADOS

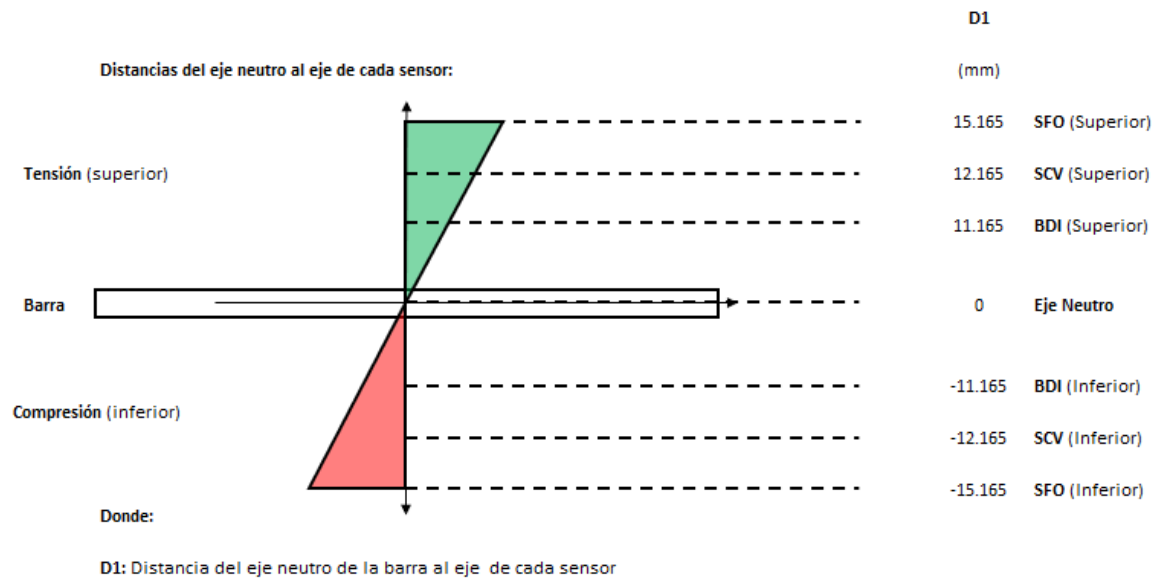


Figura 5.3.50 Esquema para realizar la interpolación de resultados, donde con líneas punteadas se muestran los niveles de los ejes de cada sensor la barra metálica Tipo 02

Por lo cuál se propuso realizar una interpolación lineal de los resultados obtenidos por cada sensor para obtener la deformación a la altura de la superficie de la barra, ya sea en las fibras superiores o inferiores.

Para la realización de la interpolación se siguieron las teorías de elasticidad de los materiales y se supuso un comportamiento lineal de las

deformaciones ocurridas en la sección transversal de la barra. Por lo cual se usó el teorema de semejanza de triángulos para determinar las deformaciones a la cara superior e inferior de la barra.

Debido a esto, para obtener las deformaciones se hizo uso de la ecuación 5.1 la cual se muestra a continuación:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_i}{d_i} \cdot d \quad (5.3.1)$$

Donde:

ε Deformación en la superficie de la barra

ε_i Deformación reportada por el sensor

d_i Distancia al eje neutro del sensor en cuestión

d Distancia del eje neutro a la fibra superior o inferior, es decir la mitad del espesor de la barra.

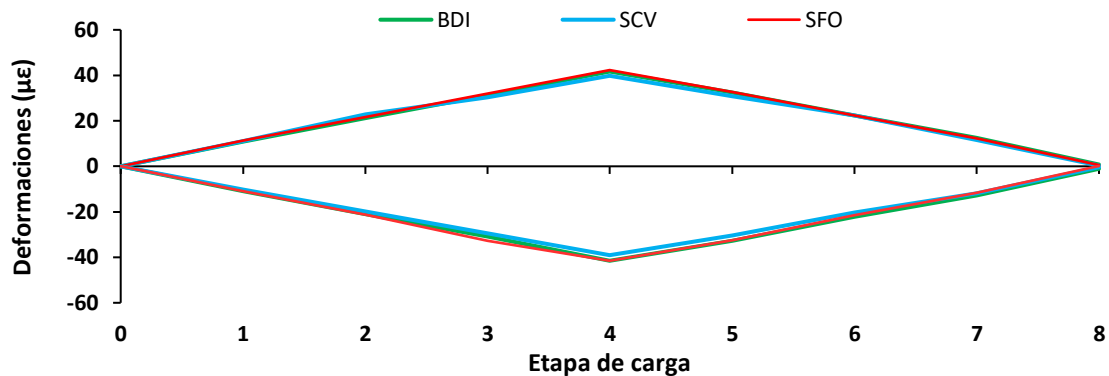
Los valores obtenidos al aplicar la ecuación 5.1 se presentan a continuación:

Tabla 5.3.20 Deformaciones interpoladas a la superficie de la barra tipo 02

Sensores de deformación		Sensores de cuerda vibrante		Sensor de fibra óptica	
Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)
0	0	0	0	0	0
10.877	-10.877	11.026	-10.331	11.295	-10.977
21.188	-20.906	22.94	-19.78	21.635	-21.158
31.217	-30.935	30.304	-29.386	31.976	-32.771
41.67	-41.529	39.797	-39.064	42.316	-41.521
32.489	-32.771	30.894	-30.498	32.771	-32.453
22.318	-22.177	22.313	-20.43	22.272	-21.476
12.43	-12.713	11.567	-11.83	12.249	-11.613
0.848	-0.989	0.428	-0.378	0.477	0.159

Al graficar los valores de la tabla 5.3.20 resulta el gráfico 5.3.16 en el cual podemos observar que los valores reportados entre los dos tipos de sensores son casi idénticos, también de que se puede apreciar una

simetría de la cara superior con la inferior y que el sensor se comporta de manera idéntica cuando se carga la barra y cuando se descarga.



Gráfica 5.3.16 Comparación de las deformaciones obtenidas para la cara superior e inferior de la barra.

En el siguiente apartado, se obtendrán los esfuerzos teóricos que ocurrieron en los puntos de interés, los cuales usaremos para obtener el módulo de elasticidad de la barra y compáralo con el módulo teórico.

5.3.2.4 Modelo analítico de la barra Tipo 02

- Geometría del experimento

La sección transversal de la barra de acero tiene forma rectangular de dimensiones 0.633 cm x 5.095 cm.

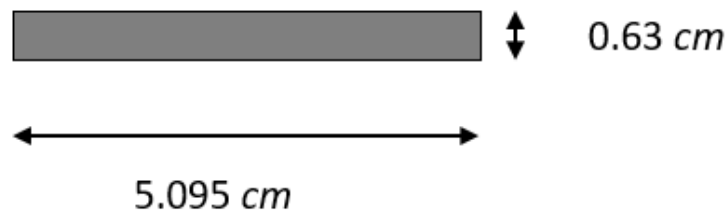


Figura 5.3.51 Sección transversal de la barra metálica Tipo 02

La idealización del modelo se presenta a continuación, en donde se indica el extremo empotrado, el punto de aplicación de carga y la sección de interés que se encuentra a 23 (cm) del empotramiento.

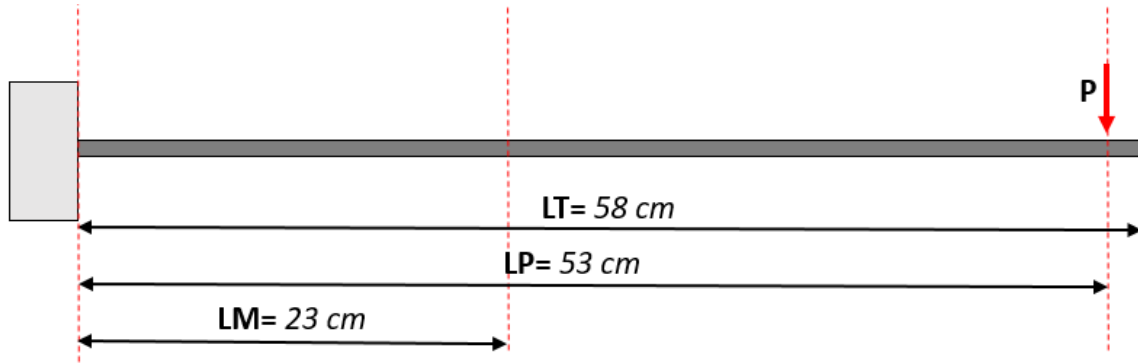


Figura 5.3.52 Modelo idealizado de la barra metálica

Dentro de la sección de interés, se pretende comparar las deformaciones teóricas con las deformaciones obtenidas de forma experimental mediante los SFO, CV y los BDI. A continuación, se muestran los puntos de interés, los cuales están situados a 23 cm del empotramiento tanto en la parte superior de la barra como en la inferior.

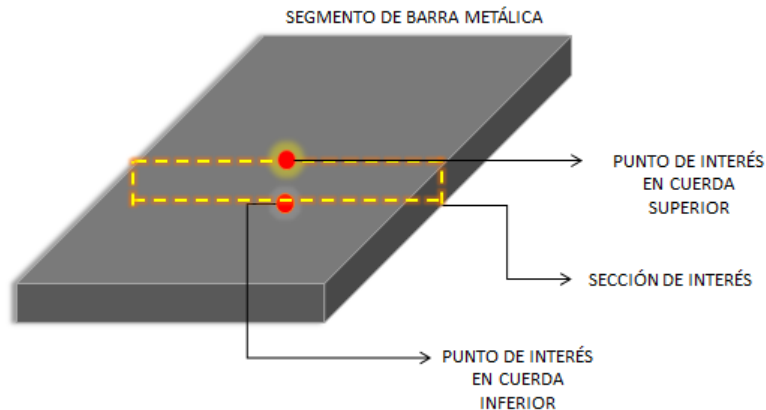


Figura 5.3.53 Puntos de interés

El procedimiento para obtener las deformaciones es análogo a lo establecido en el capítulo 5.3.1 con la diferencia de que se aplican las condiciones características del presente experimento.

Partiendo de la Ley de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.1)$$

Donde:

- E Es el módulo de elasticidad del material, en nuestro caso lo consideraremos como 2.04×10^6 (kgf/cm²).
- σ Es el esfuerzo normal en un punto, en nuestro caso serán los puntos de interés antes mencionados.
- ε Es la deformación unitaria en un punto, para nuestro caso serán los puntos de interés antes mencionados.

La deformación unitaria será el principal parámetro de estudio, por lo cual despejando de la ecuación 1.1 Se obtiene ε .

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (5.3.1)$$

El módulo de elasticidad es una propiedad del material, por lo que es un dato con el que se cuenta. El esfuerzo normal puede ser determinado a partir de la fórmula de la escuadría, la cual se presenta a continuación.

$$\sigma = \frac{M}{I}y \quad (5.3.2)$$

Donde:

- σ Es el esfuerzo normal en un punto, en este caso serán los puntos de interés antes mencionados.
- M Es el momento flexionante que actúa en la sección de interés.
- I Es el momento de inercia de la sección transversal de la barra.
- y Es la distancia ortogonal desde el eje neutro hasta el punto de interés, en nuestro caso será equivalente a la mitad del espesor de la barra 0.317 cm.

Para obtener el momento de inercia de la barra se usa la ecuación 5.3.3:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (5.3.3)$$

Donde:

- b Es el ancho de la barra, 5.095 cm.
- h es el espesor de la barra, 0.633 cm.

Sustituyendo los valores, se obtiene:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{5.095\text{cm} * (0.633\text{cm})^3}{12} = 0.108\text{ cm}^4$$

Ahora se procede a obtener el momento que actúa en la sección de interés, para ello se obtuvo la ecuación de momento de la barra y las reacciones en el apoyo.

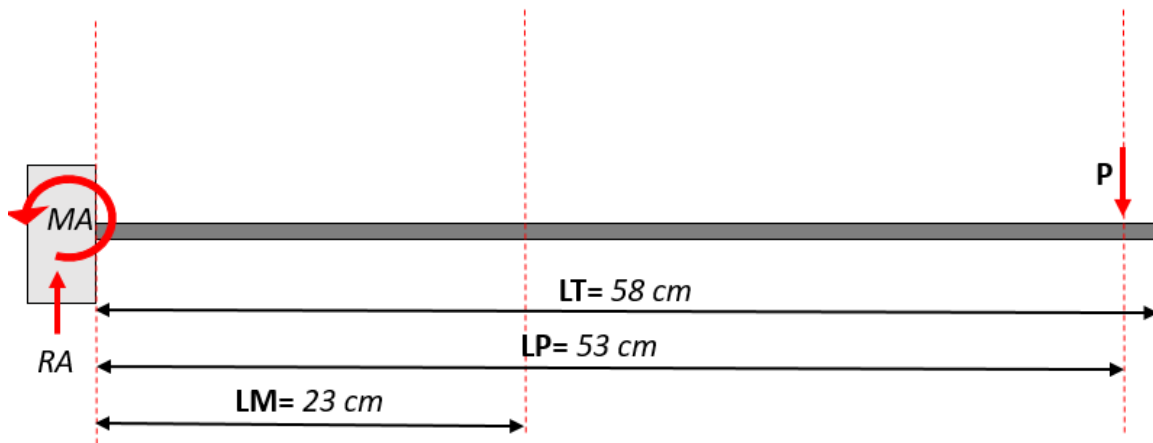


Figura 5.3.54 Reacciones en el apoyo para la barra tipo 02

$$\sum M_A = M_A - P(L_P) = 0$$

$$M_A = PL_P$$

$$R_A = P$$

Una vez obtenidos los valores de las reacciones en el apoyo, se continúa con la determinación de la ecuación de momento tal como se obtuvo en el capítulo 5.3.1 con las características para la barra tipo 02.

Para: $0 < x \leq L_p$

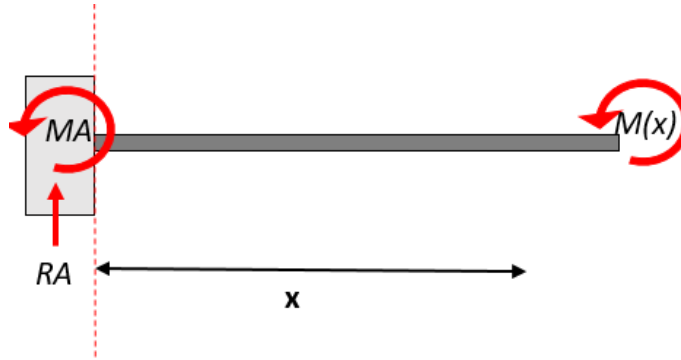


Figura 5.3.55 segundo segmento de barra para obtener ecuación de momento

$$M(x) - R_A x + M_A + P(x - L_p) = 0$$

Despejando $M(x)$ y sustituyendo las reacciones en el apoyo:

$$M(x) = R_A x - M_A = Px - PL_p = P(x - L_p) \quad (5.3.4)$$

Como siguiente paso, obtenemos el momento en la sección de interés, es decir, a 23 cm del apoyo. El desarrollo que se presenta a continuación será desde 0 hasta una carga de 1033.7 (kgf).

Tabla 5.3.21 Etapas de carga (Barra tipo 02)

Etapa de carga	Carga [P]
	(kgf)
0	0
1	0.2837
2	0.5337
3	0.7837
4	1.0337
5	0.7837
6	0.5337
7	0.2837
8	0

Al sustituir los valores de P en la ecuación 5.3.4 se obtienen los valores del momento flexionante para cada etapa de carga.

Tabla 5.3.22 Valores de momento en la sección de interés y para cada etapa de carga (Barra tipo 02)

Etapa de carga	Carga [P]	Momento [M]
	(kgf)	(kgf*cm)
0	0	0
1	0.2837	8.6
2	0.5337	16.2
3	0.7837	23.7
4	1.0337	31.2
5	0.7837	23.7
6	0.5337	16.1
7	0.2837	8.6
8	0	0

Posteriormente con la fórmula de la escuadría se obtienen los valores de esfuerzo para cada etapa de carga.

$$\sigma = \frac{M}{I}y$$

Tabla 5.3.23 Esfuerzo normal a lo largo de la barra y para las cinco etapas de carga (Barra tipo 02)

Etapa de carga	Carga [P]	Momento [M]	Esfuerzo [σ]
	(kgf)	(kgf*cm)	(kgf/cm ²)
0	0	0	0
1	0.2837	8.6	25.184
2	0.5337	16.2	47.669
3	0.7837	23.7	69.569
4	1.0337	31.2	91.761
5	0.7837	23.7	69.569
6	0.5337	16.1	47.376
7	0.2837	8.6	25.184
8	0	0	0

Finalmente, a partir de la Ley de Hooke, se obtienen las deformaciones unitarias teóricas para cada esfuerzo normal.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Tabla 5.3.24 Valores absolutos teóricos de deformación en los puntos de interés (Barra tipo 02)

Etapa de carga	Carga [P]	Momento [M]	Esfuerzo [σ]	Deformación [ε]
	(kgf)	(kgf*cm)	(kgf/cm2)	(με)
0	0	0	0	0
1	0.2837	8.6	25.184	12.35
2	0.5337	16.2	47.669	23.38
3	0.7837	23.7	69.569	34.12
4	1.0337	31.2	91.761	45
5	0.7837	23.7	69.569	34.12
6	0.5337	16.1	47.376	23.24
7	0.2837	8.6	25.184	12.35
8	0	0	0	0

Para comprobar los resultados, se puede obtener el módulo de elasticidad a partir de los valores obtenidos de esfuerzo y de deformación.

Tabla 5.3.25 resumen de esfuerzos y deformaciones obtenidas para el punto de interés (Barra tipo 02)

Etapa de carga	Esfuerzo [σ]	Deformación [ε]
	(kgf/cm2)	(με)
0	0	0
1	25.184	12.35
2	47.669	23.38
3	69.569	34.12
4	91.761	45
5	69.569	34.12
6	47.376	23.24
7	25.184	12.35
8	0	0

La relación de esfuerzo entre deformación es el módulo de elasticidad, por lo cual para los datos obtenidos se usó la ecuación 5.3.5 para obtener el valor de la pendiente.

$$m = \frac{\sum xy - \frac{\sum x * \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad (5.3.5)$$

Donde:

- x Es una microdeformación
- y Es el esfuerzo normal
- n Es número de muestras
- m Es el módulo de elasticidad E

Calculando los parámetros necesarios para la obtención del módulo de elasticidad, en donde los valores de x corresponden a los esfuerzos y los valores y a las deformaciones se obtiene:

$$\Sigma xy = 11714.100$$

$$\Sigma x = 184.557$$

$$\Sigma y = 376.312$$

$$\Sigma x^2 = 5745.020$$

Al sustituir los valores correspondientes en la ecuación 5.3.5 se obtiene el valor del módulo de elasticidad.

$$m = E = 2.04 * 10^6 \frac{kgf}{cm^2}$$

Modelo analítico con un programa de análisis estructural

Para complementar el estudio teórico se realizaron dos modelos analíticos en un programa de análisis estructural, los modelos se presentan a continuación:

El procedimiento realizado fue el mismo que se estableció en el punto 5.3.1.4. adecuando el modelo a las condiciones de la barra tipo 02.

El primer modelo consiste en un elemento barra al cual se le dieron las condiciones necesarias para representar el experimento real.

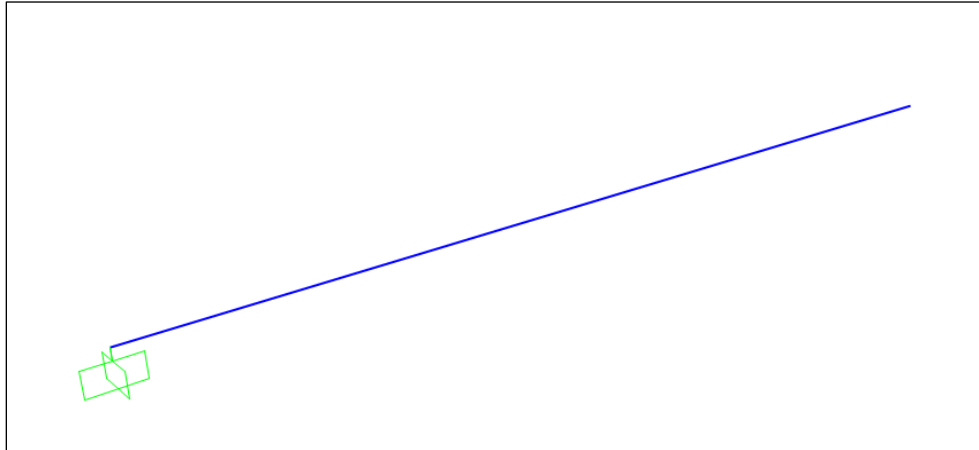


Figura 5.3.56 Modelo 1 Barra Tipo 02

Una vez que se ha seguido el procedimiento se obtienen los diagramas de elementos mecánicos para cada etapa de carga del experimento (tabla 5.3.21).

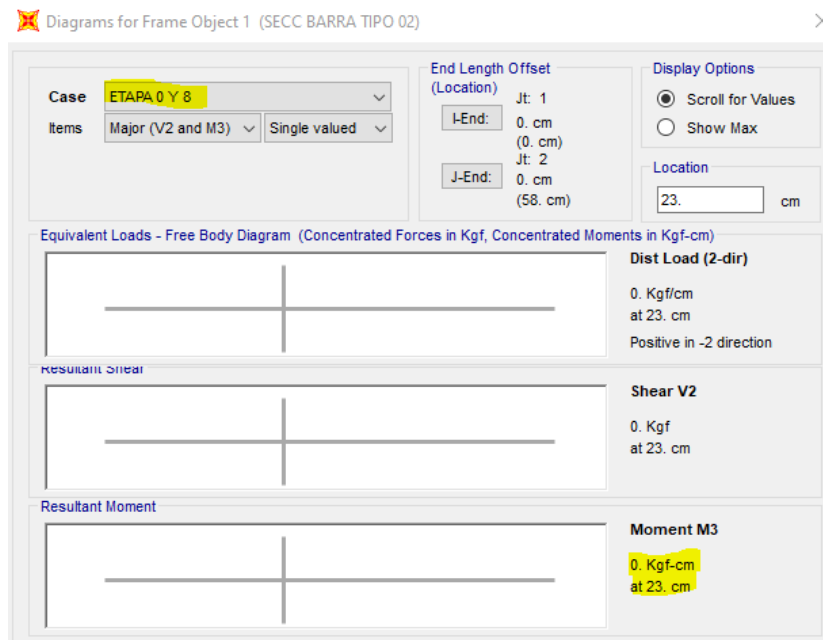


Figura 5.3.57 Diagramas de la barra para la etapa 0 y 8

En las imágenes que se muestran a continuación es posible observar las reacciones en el apoyo, así como el momento que actúa a 35 cm del extremo empotrado para las etapas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7. (figuras 5.3.58, 5.3.59, 5.3.60 y 5.3.61 respectivamente).

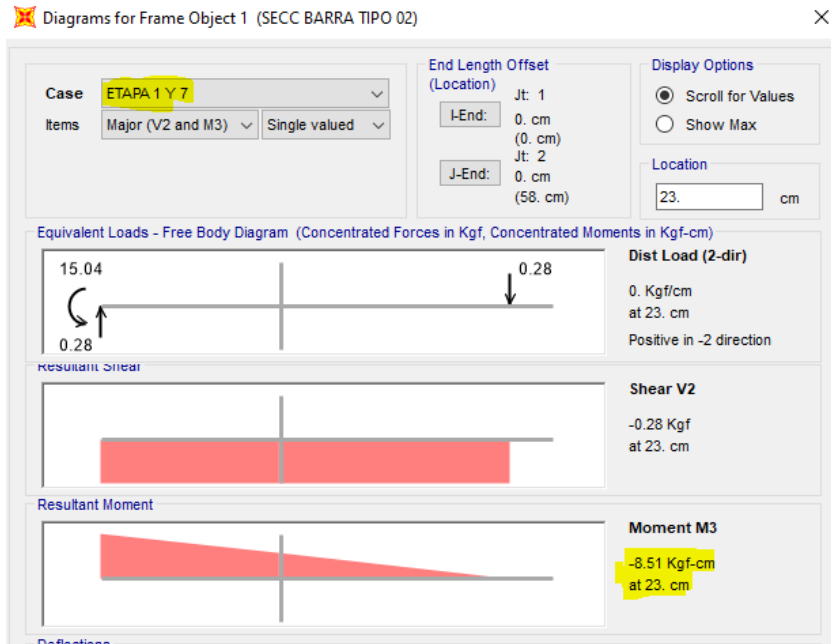


Figura 5.3.58 Diagramas de la barra para la etapa 1 y 7

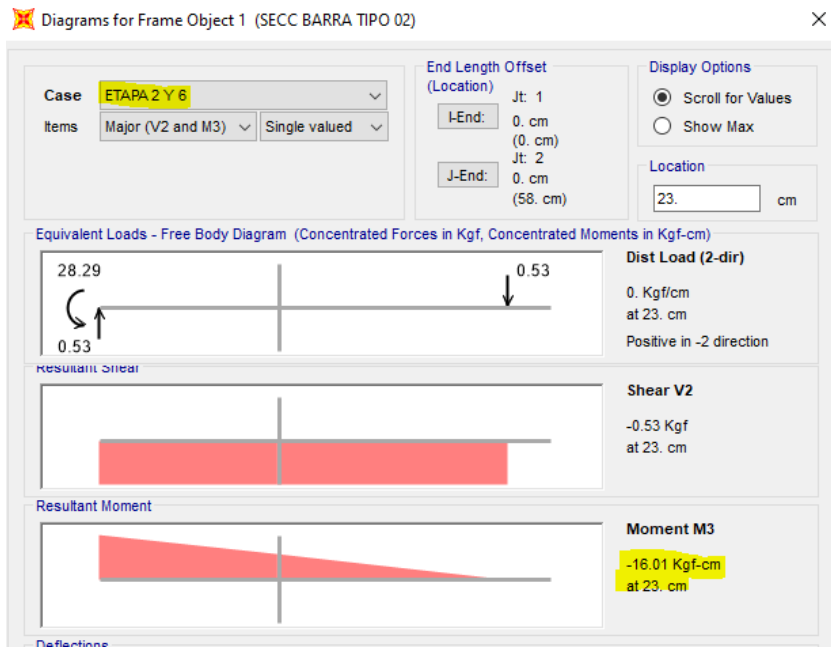


Figura 5.3.59 Diagramas de la barra para la etapa 2 y 6

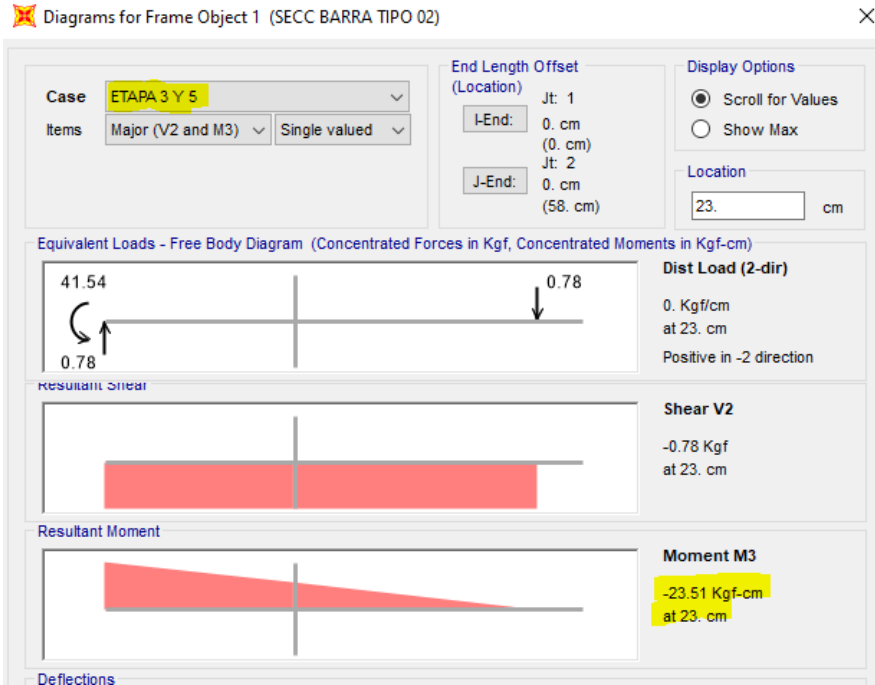


Figura 5.3.60 Diagramas de la barra para la etapa 3 y 5

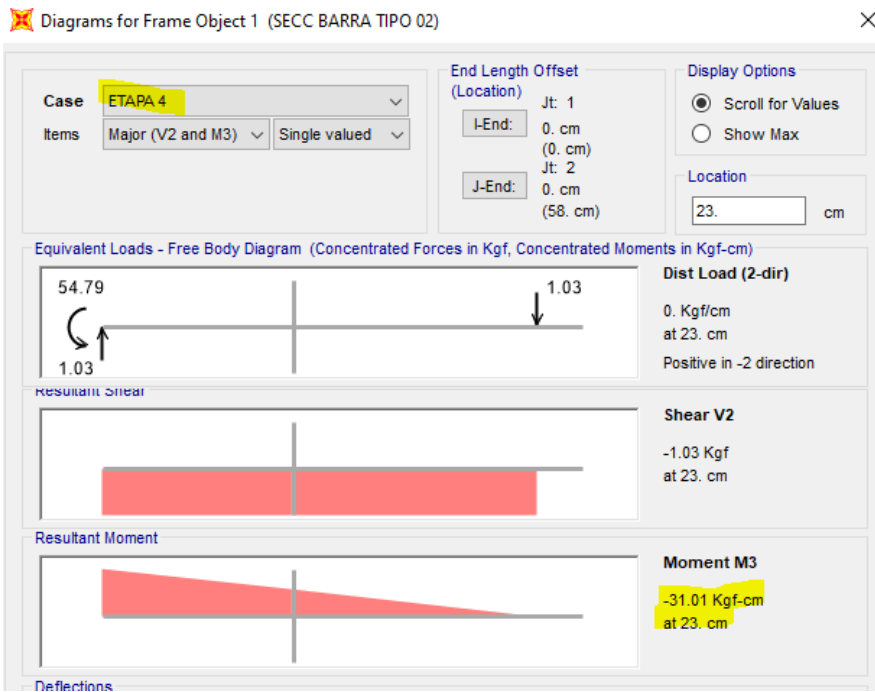


Figura 5.3.61 Diagramas de la barra para la etapa 4

A continuación, se muestra una tabla comparativa del valor del momento obtenido con el desarrollo matemático y con el programa computacional.

Tabla 5.3.26 Comparación de momentos a 35 cm del extremo empotrado

Etapa de carga	Carga [P]	Momento con el programa [M]	Momento Teórico [M]
	(kgf)	(kgf*cm)	(kgf*cm)
0	0	0	0
1	0.284	8.51	8.57
2	0.534	16.01	16.22
3	0.784	23.51	23.67
4	1.034	31.01	31.22
5	0.784	23.51	23.67
6	0.534	16.01	16.12
7	0.284	8.51	8.57
8	0	0	0

Modelo de elementos finitos con un programa de análisis estructural

Con el fin de tener una comparación más detallada, realizamos un modelo de elementos finitos en el mismo software de análisis estructural.

El procedimiento a seguir es el mismo que se ha descrito en el punto 5.3.1.4 para un modelo elementos finitos asignado las propiedades geométricas de la barra tipo 02.

Las características particulares para este experimento se presentan a continuación partiendo del paso 7:

- 7- Para la barra tipo 02 se debe colocar un nodo especial a 53 cm del empotramiento, porque será ahí en donde se aplicarán las cargas.

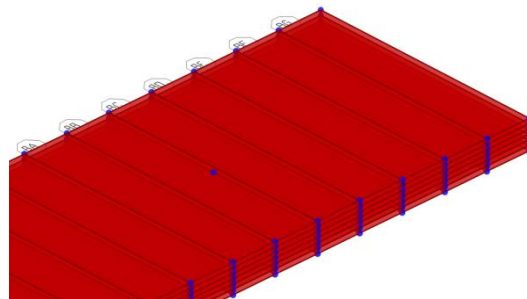


Figura 5.3.56 Nodo adicional asignado (Barra tipo 02)

8- En la sección de "Load patterns" se definen cinco condiciones de carga según lo establecido en la tabla 5.3.21.

9- Una vez definidas las condiciones de carga, se aplican las fuerzas P al nodo que está situado a 53 (cm) del extremo empotrado.

10 - Se procede a realizar el análisis en el programa y se presentan los valores de los esfuerzos sobre la barra (figura 5.3.57).

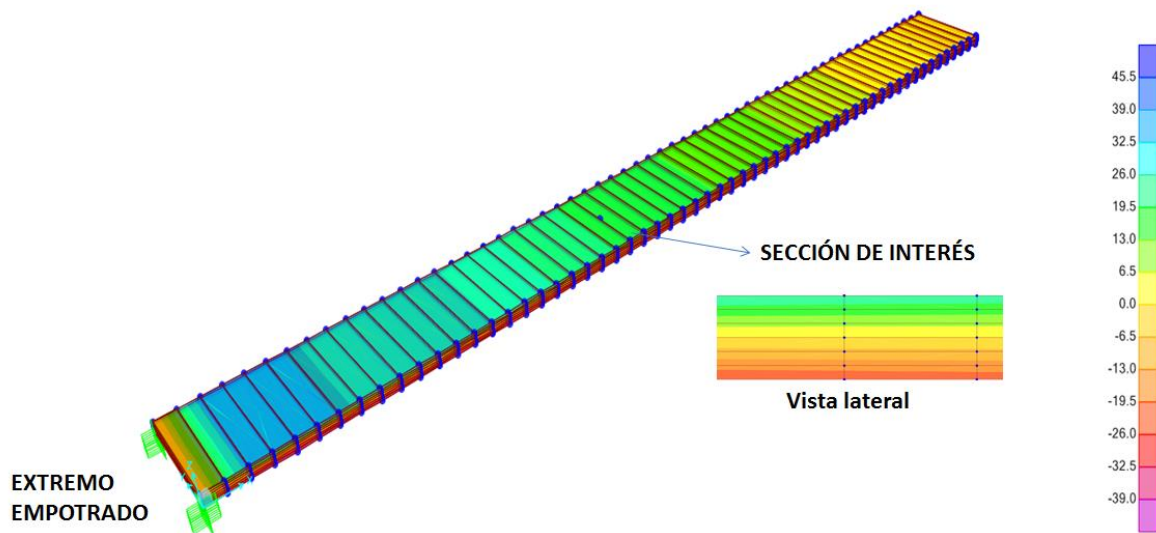


Figura 5.3.57 Esfuerzos normales para la etapa 4 además se indica la sección de interés (Barra tipo 02)

A continuación, se muestran los esfuerzos que se obtuvieron en la sección de interés:

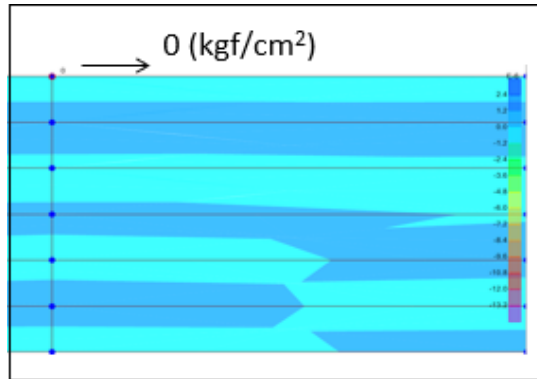


Figura 5.5.58 Valores de esfuerzo normal en la sección de interés para las etapas 0 y 8 (Barra tipo 02)

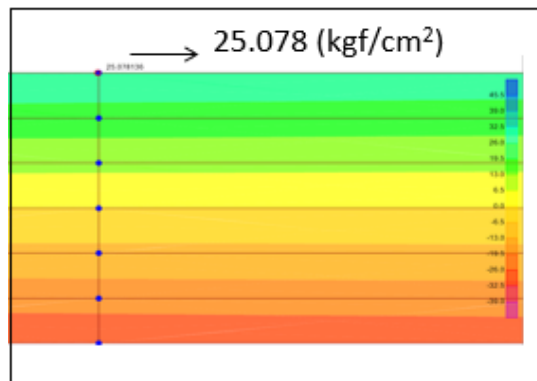


Figura 5.5.59 Valores de esfuerzo normal en la sección de interés para las etapas 1 y 7 (Barra tipo 02)

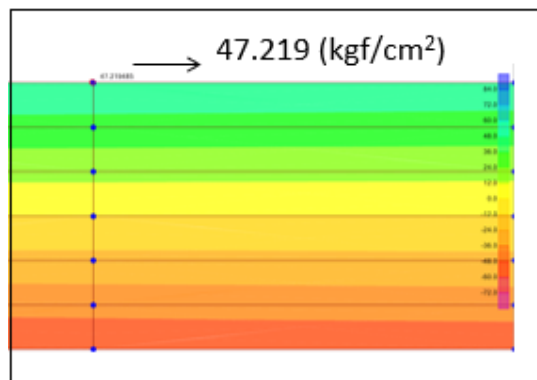


Figura 5.5.60 Valores de esfuerzo normal en la sección de interés para las etapas 2 y 6 (Barra tipo 02)

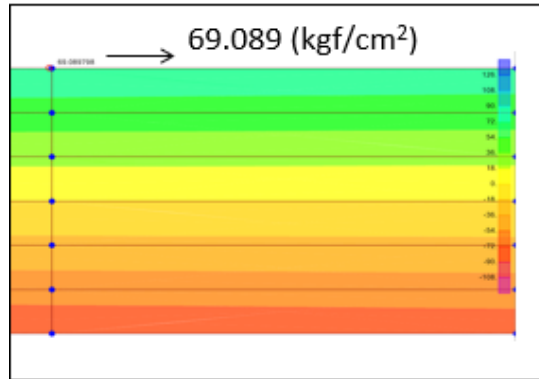


Figura 5.5.61 Valores de esfuerzo normal en la sección de interés para las etapas 3 y 5 (Barra tipo 02)

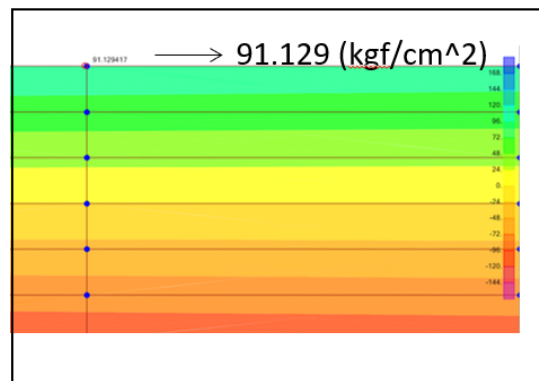


Figura 5.5.62 Valores de esfuerzo normal en la sección de interés para la etapa 4 (Barra tipo 02)

Tabla 5.3.27 Resumen de esfuerzos y deformaciones obtenidos mediante un modelo de elementos finitos (Barra tipo 02)

Etapa de carga	Carga [P]	Esfuerzo teórico $[\sigma]$	Esfuerzo elementos finitos $[\sigma]$	Deformación teórica $[\epsilon]$	Deformación elementos finitos $[\epsilon]$
	(kgf)	(kgf*cm)	(kgf*cm)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)
0	0	0	0	0	0
1	0.284	25.184	25.078	12.35	12.293
2	0.534	47.669	47.219	23.38	23.147
3	0.784	69.569	69.089	34.12	33.867
4	1.034	91.761	91.129	45	44.671
5	0.784	69.569	69.089	34.12	33.867
6	0.534	47.376	47.219	23.24	23.147
7	0.284	25.184	25.078	12.35	12.293
8	0	0	0	0	0

5.3.2.5 Comparación entre resultados analíticos y experimentales de la barra Tipo 02

El principal parámetro de comparación es el módulo de elasticidad. En la siguiente tabla se presentan los valores de esfuerzo teórico y las deformaciones obtenidas mediante los métodos antes presentados.

Para poder obtener el valor del módulo de elasticidad, se realizó una regresión lineal con los valores de deformación de cada experimento y los esfuerzos teóricos.

Tabla 5.3.28 Tabla comparativa para la barra Tipo 02

Etapa de carga	Carga P (kgf)	Esfuerzos σ (kgf/cm ²)	Deformaciones							
			Teórica	Elementos finitos	Sensores de deformación		Sensores de Cuerda Vibrante		Sensores de fibra óptica	
			Sup - Inf	Sup - Inf	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
			($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.2837	25.184	12.35	12.29	10.877	-10.877	11.026	-10.331	11.295	-10.977
2	0.5337	47.669	23.38	23.15	21.188	-20.906	22.94	-19.78	21.635	-21.158
3	0.7837	69.569	34.12	33.87	31.217	-30.935	30.304	-29.386	31.976	-32.771
4	1.0337	91.761	45	44.67	41.67	-41.529	39.797	-39.064	42.316	-41.521
5	0.7837	69.569	34.12	33.87	32.489	-32.771	30.894	-30.498	32.771	-32.453
6	0.5337	47.376	23.24	23.15	22.318	-22.177	22.313	-20.43	22.272	-21.476
7	0.2837	25.184	12.35	12.29	12.43	-12.713	11.567	-11.83	12.249	-11.613
8	0	0	0	0	0.848	-0.989	0.428	-0.378	0.477	0.159

Módulo de elasticidad (kgf/cm²) x10⁶	2.04	2.05	2.21	2.22	2.29	2.35	2.17	2.17
%Error	0%	1%	9%	9%	12%	15%	7%	6%

$$\%Error = \left| \frac{Valor\ teórico - Valor\ experimental}{Valor\ teórico} \right|$$

Conclusiones del caso de dos barras metálicas en voladizo

- a) El realizar dos experimentos sencillos permitió entender de mejor manera el funcionamiento de cada sensor, lo cual puede presentar una ventaja al momento de decidir que sensor será usado para una prueba en particular
- b) El uso de DE permite obtener lecturas directas de los valores de deformación sobre una superficie de estudio, sin embargo, el tiempo de instalación puede ser una desventaja en pruebas que se necesiten una rápida instalación.
- c) El usar varios tipos de sensores permitió comparar el desempeño de cada sensor y con ayuda de los resultados teóricos se verificó la fiabilidad de los resultados reportados.
- d) Para estos experimentos se pudo comparar los resultados teóricos con los resultados que se obtienen de programas comerciales para análisis estructural lo cual representa una oportunidad para comprender los programas computacionales y poder aprovechar al máximo sus cualidades.

5.4 Prueba de un muro sujeto a carga lateral

En este subcapítulo se estudia el comportamiento de los SFO y los sensores BDI colocados sobre la superficie de un muro hecho a base de adobe con la particularidad de que ha sido reforzado con una malla electro soldada de acero. Se hace una breve descripción de experimento y se muestran los resultados de deformación que se obtuvieron.

5.4.1 Descripción del experimento

Dentro del Instituto de Ingeniería UNAM, se participó en la instrumentación de un muro de adobe reforzado. (figura 5.4.1) el cual sirvió para el estudio de estructuras de adobe. (*Sánchez AR y Villa J.G. Seguimiento de la integridad de edificios históricos que podrían verse afectados por la construcción del túnel y de lagunas estaciones de la Línea 3 del Tren Ligero de Guadalajara*)

El muro de adobe reforzado que se estudió fue el llamado "Espécimen 4" el cual fue construido a base de bloques de adobe.



Figura 5.4.1 Muro de adobe aún sin refuerzo y sin recubrimiento – Espécimen 4

Se le denomina muro de adobe reforzado porque se colocó una malla de acero electrosoldada en las caras laterales del muro, la cual aportaría resistencia a la tensión y confinamiento al adobe.

Posteriormente la malla electrosoldada se cubrió con una mezcla de mortero, para garantizar la adherencia con el muro de adobe.

Finalmente se procedió a darle un acabado con una mezcla de cal y agua la cual fue pintada con pintura blanca para poder trazar sobre las caras laterales una malla cuadrícula, la cual serviría como referencia al momento de la instalación de los sensores y ayudar con la identificación grietas.

El muro fue montado sobre una zapata de concreto reforzado, que anclada con barras de acero a la losa base del laboratorio, simulaba una cimentación rígida para el muro (Figura 5.4.2). Por otro lado, en la parte superior, el muro estaba unido a una trabe de concreto reforzado anclada a su a una viga de acero (que en la etapa de prueba sería la responsable de transmitir las cargas de los actuadores al muro (Figura 5.4.2)) mediante tornillos, tuercas y placas de acero.

En la figura 5.4.2, se observa del lado izquierdo un actuador vertical, en la parte superior se puede observar la viga de acero que trasmite cargas y al fondo, el muro de reacción responsable de servir como apoyo rígido para el actuador horizontal.



Figura 5.4.2 Espécimen 4 montado en el marco de carga y listo para iniciar la prueba

La aplicación de fuerzas se llevó a cabo mediante tres actuadores de carga como se muestra en la figura 5.4.3, se colocaron dos actuadores verticales, uno en cada costado del muro, dichos actuadores estaban anclados a la viga de acero y a la zapata de concreto, el actuador restante (actuador 1) se colocó horizontalmente en la parte superior del muro de adobe, dicho actuador estuvo anclado a la viga de acero y al muro de reacción del laboratorio.

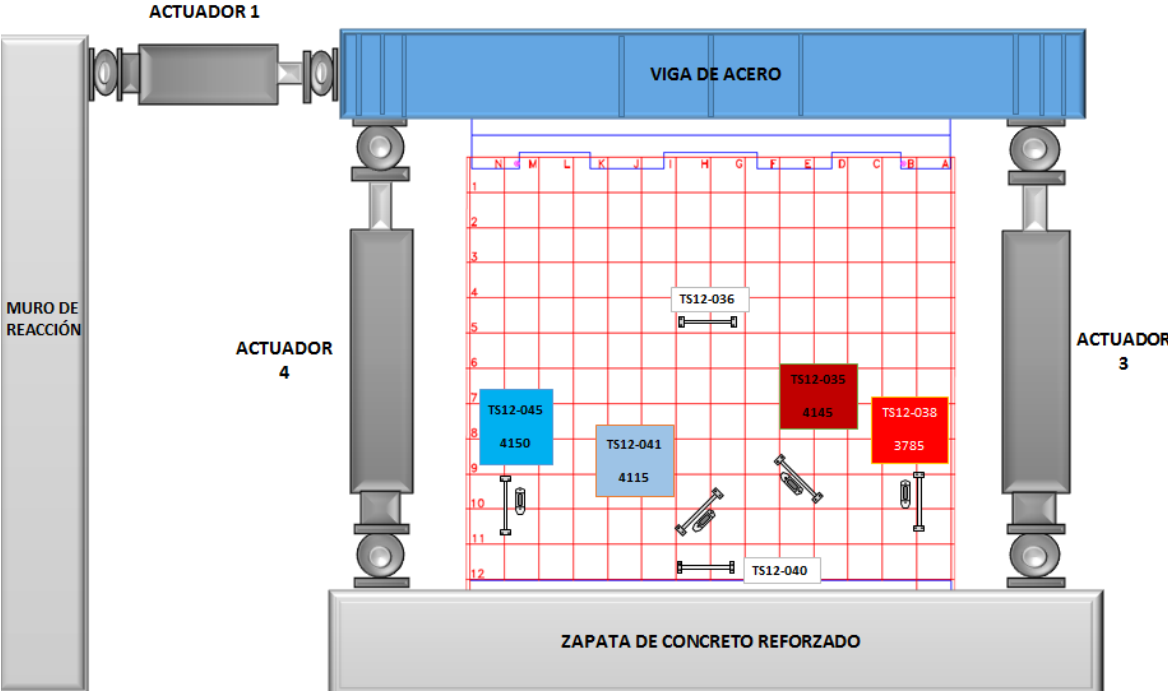


Figura 5.4.3 Sistema de aplicación de carga al muro

Para entender la prueba de mejor manera a continuación se presenta la historia de carga de los actuadores 1, 3 y 4 (gráficos 5.4.1, 5.4.2 y 5.4.3) y sus respectivos desplazamientos (gráficos 5.4.4, 5.4.5 y 5.4.6).

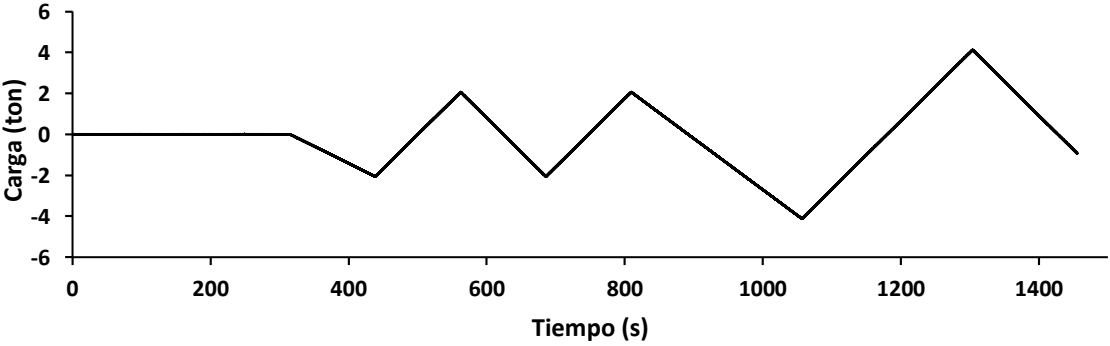


Gráfico 5.4.1 Carga aplicada por el Actuador 1

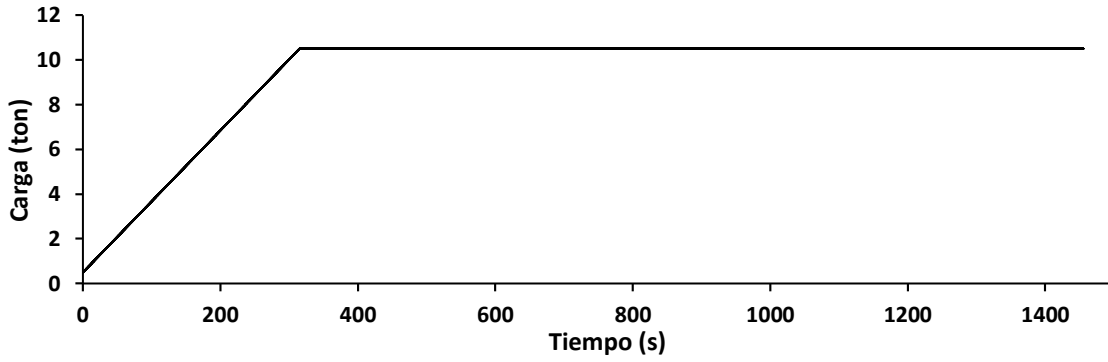


Gráfico 5.4.2 Carga aplicada por el Actuador 3

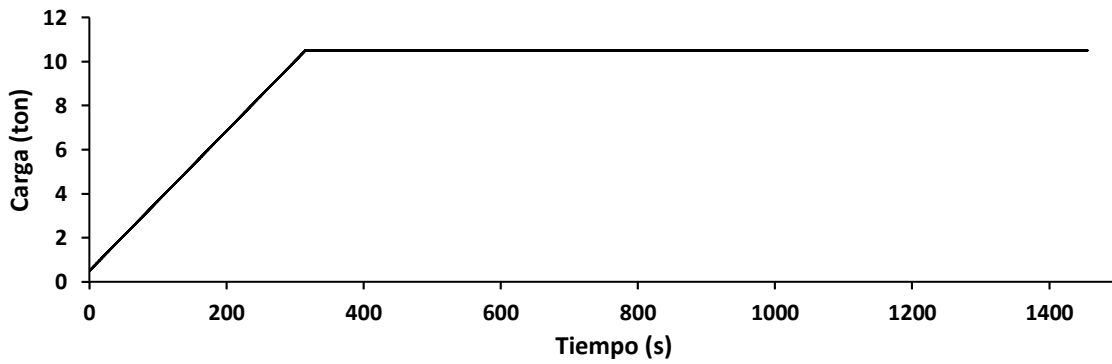


Gráfico 5.4.3 Carga aplicada por el Actuador 4

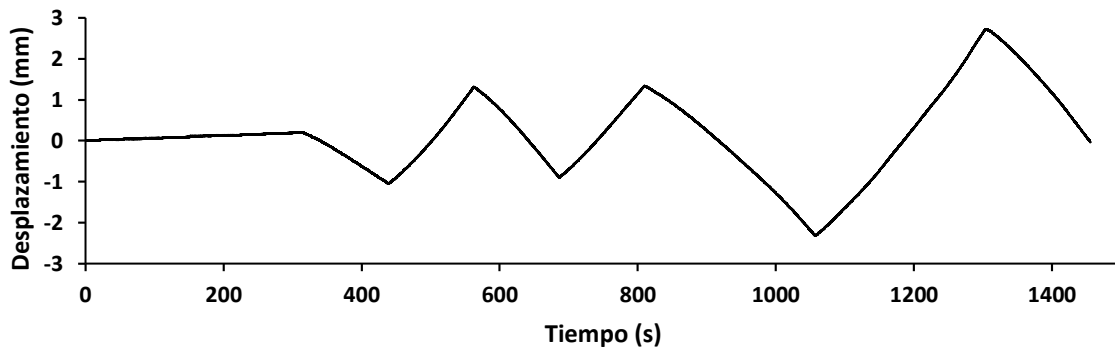


Gráfico 5.4.4 Desplazamiento del Actuador 1

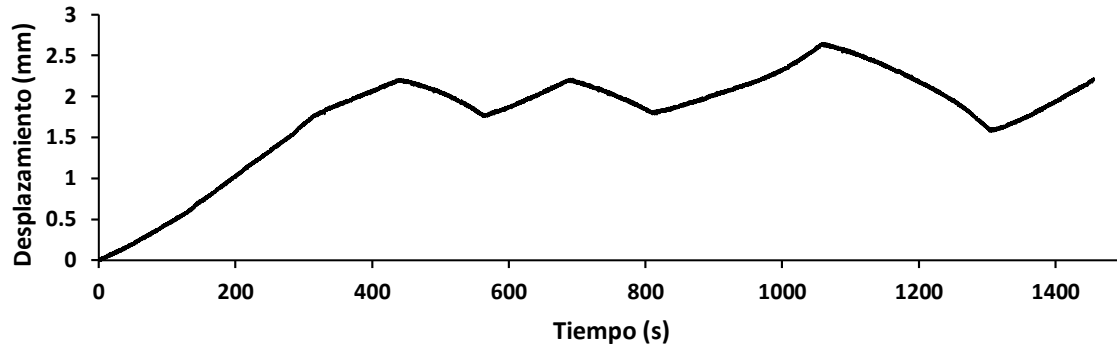


Gráfico 5.4.5 Desplazamiento del Actuador 3

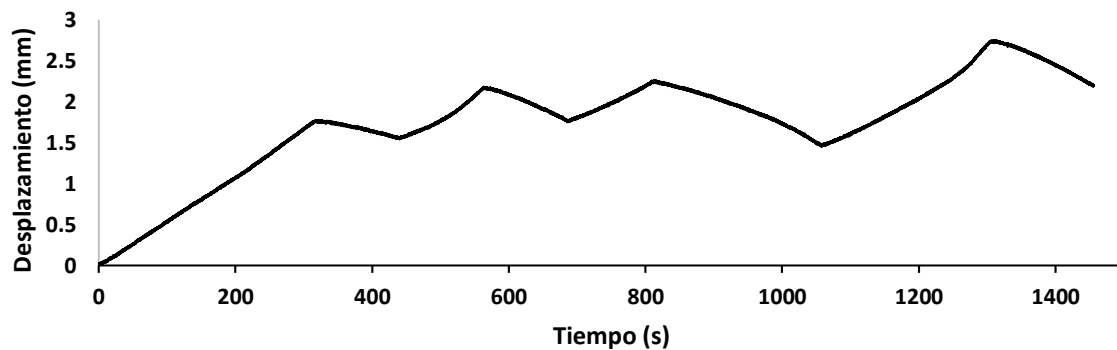


Gráfico 5.4.6 Desplazamiento del Actuador 4

5.4.2 Instrumentación

En esta prueba se hizo uso de seis SFO (TS12-035, TS12-36, TS12-038, TS12-040, TS12-041 Y TS12-045) y de cuatro BDI (D3785, D4115, D4145 y D4150).

La esencia de instalación de ambos tipos sensor fue la misma que se siguió en el Capítulo 5.1 en donde puede consultarse el procedimiento con más detalle, la diferencia en este experimento es que los sensores fueron colocados sobre una superficie de concreto el cual es un caso particular en la presente tesis debido a que la mayoría de los experimentos fueron realizados en superficies metálicas.

El procedimiento de instalación fue el siguiente:

1. *Identificar los puntos de medición:* En este caso se propusieron seis puntos de medición, cuatro de ellos estuvieron monitoreados por

una pareja de un SFO y un sensor BDI y los otros dos puntos de medición solamente por los SFO. Respecto a la orientación se colocaron dos sensores horizontales, dos verticales y dos diagonales a 45° y la distribución de los sensores, se muestra en la figura 5.4.4.

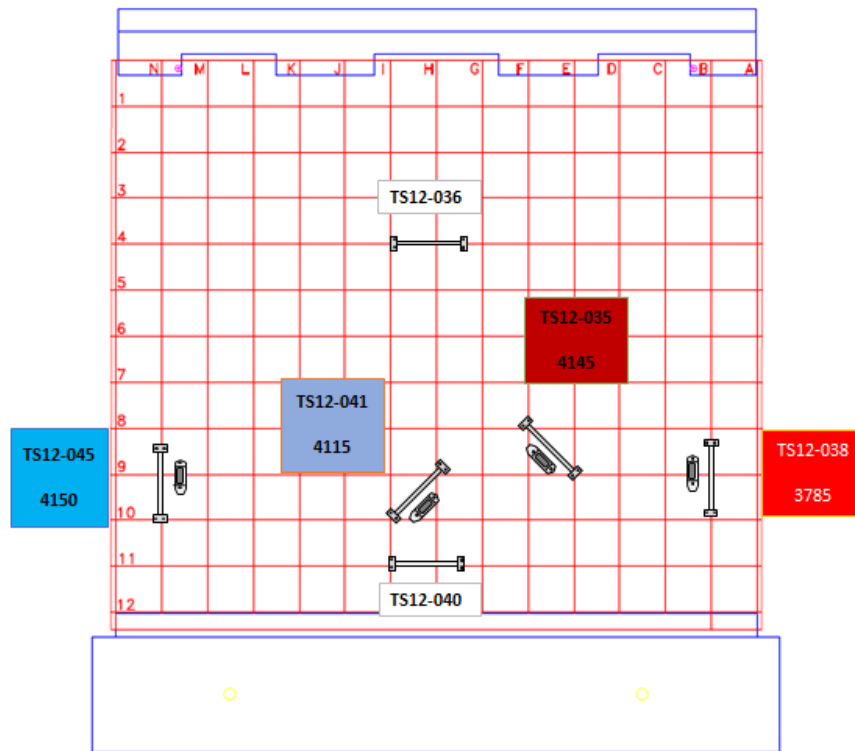


Figura 5.4.4 Distribución de sensores en el muro de adobe reforzado, con la identificación de los BDI y los SFO

2. *Limpieza de bases metálicas:* Limpiar de toda suciedad e impureza la superficie de las bases metálicas de los sensores, esto con una lija para metales y posteriormente limpiar la superficie de las bases con acetona.
3. *Limpieza de superficie del muro:* La superficie del muro también debe de encontrarse limpia, por lo cual se debe retirar la delgada capa de pintura y cal con una espátula hasta llegar al mortero que cubre la malla electrosoldada y proceder a la limpieza la superficie de mortero con acetona.
4. *Fijación de los sensores:* Para la fijación de cada sensor se debe colocar una capa de pegamento epóxico en la base del sensor. Después colocar sobre el punto de medición y sujetar firmemente

por cinco minutos hasta que los sensores queden bien adheridos al muro (figura 5.4.5).

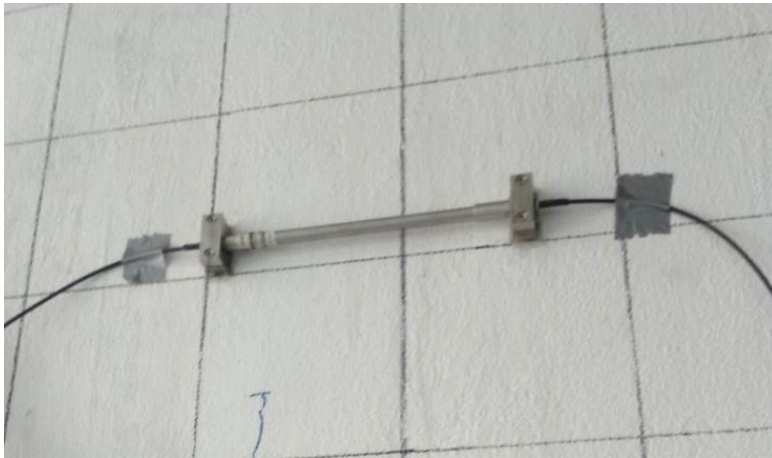


Figura 5.4.5 Sensor de fibra óptica colocado sobre el muro de adobe

5. Aseguramiento de cables: Una vez que los sensores fueron colocados sobre el muro, se debe colocar una cinta que sujete el cable (figura 5.) ya sea de la fibra óptica o de los sensores BDI, esto con el fin de evitar un posible daño de la unión entre el sensor y el cable.

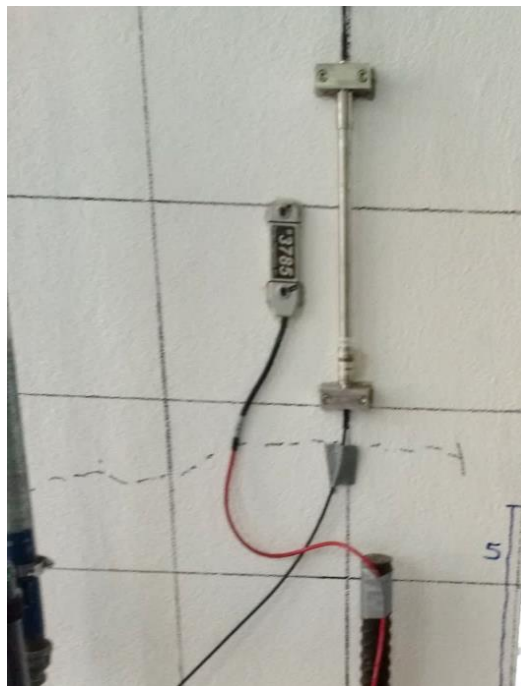


Figura 5.4.6 Sensores montados en muro de adobe

5.4.3 Análisis e interpretación de resultados

La duración de la prueba estudiada en este apartado fue de 25 minutos aproximadamente, los SFO tuvieron una frecuencia de muestreo de 25 muestras en cada segundo y los sensores BDI de 35 muestras cada segundo.

Información capturada por los sensores de fibra óptica y sensores de deformación BDI

Los datos capturados por los sensores de fibra óptica se muestran a continuación:

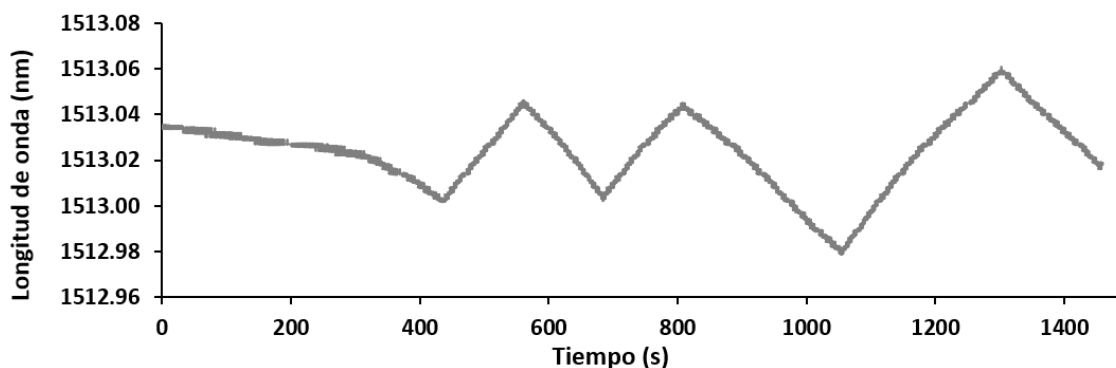


Gráfico 5.4.7 Datos capturados por el SFO (TS12-035)

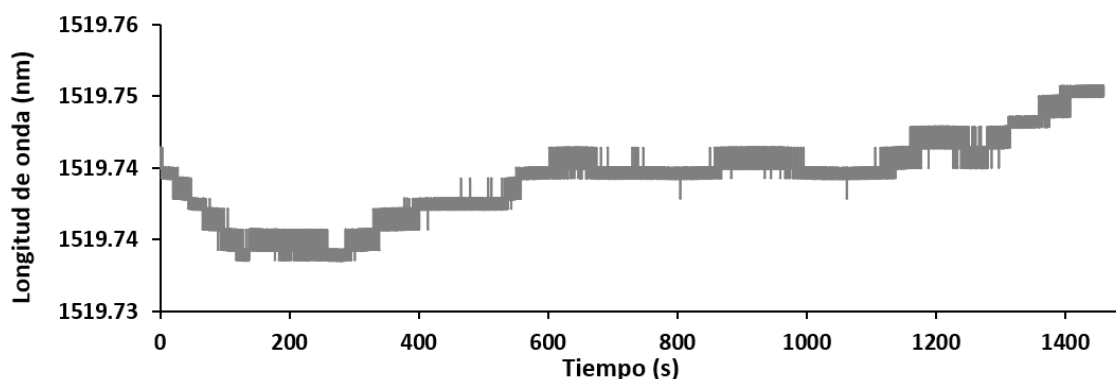


Gráfico 5.4.8 Datos capturados por el SFO (TS12-036)

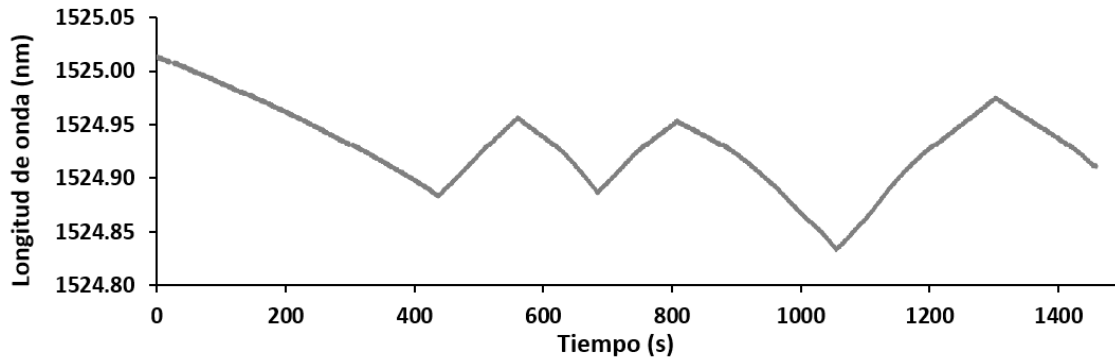


Gráfico 5.4.9 Datos capturados por el SFO (TS12-038)

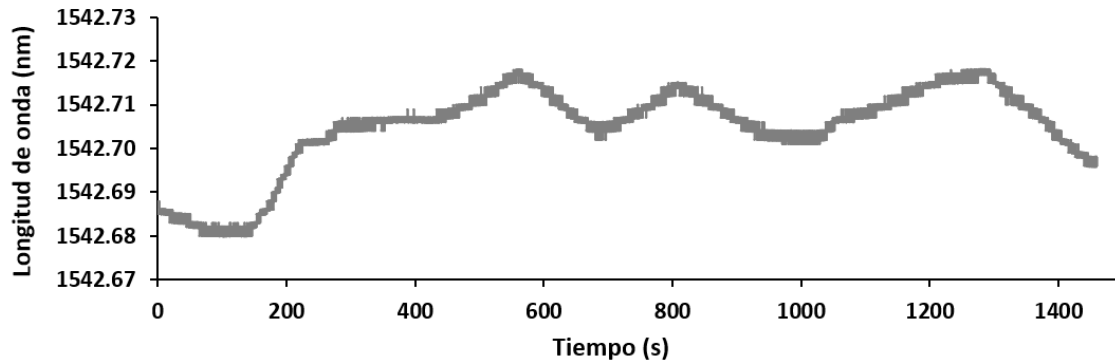


Gráfico 5.4.10 Datos capturados por el SFO (TS12-040)

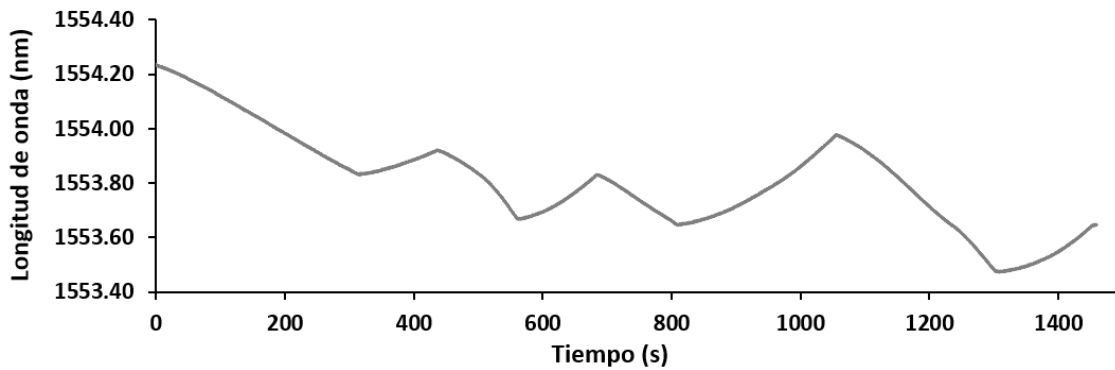


Gráfico 5.4.11 Datos capturados por el SFO (TS12-041)

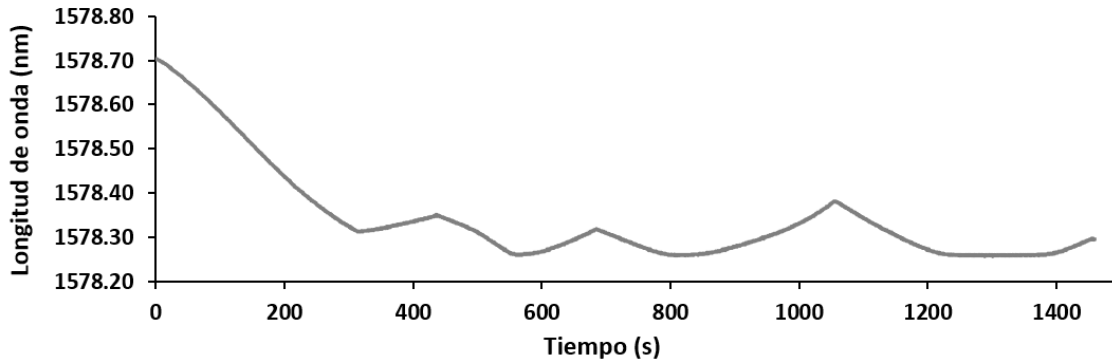


Gráfico 5.4.12 Datos capturados por el SFO (TS12-045)

Los datos capturados por los BDI se muestran a continuación:

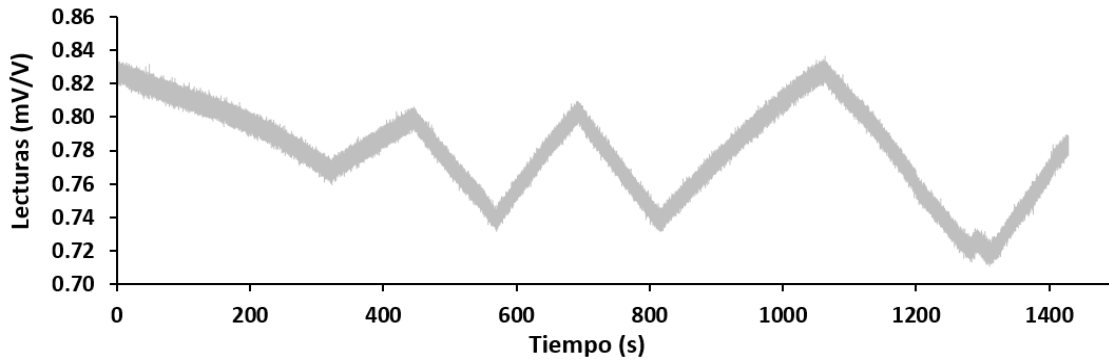


Gráfico 5.4.13 Datos capturados por el BDI (D4150)

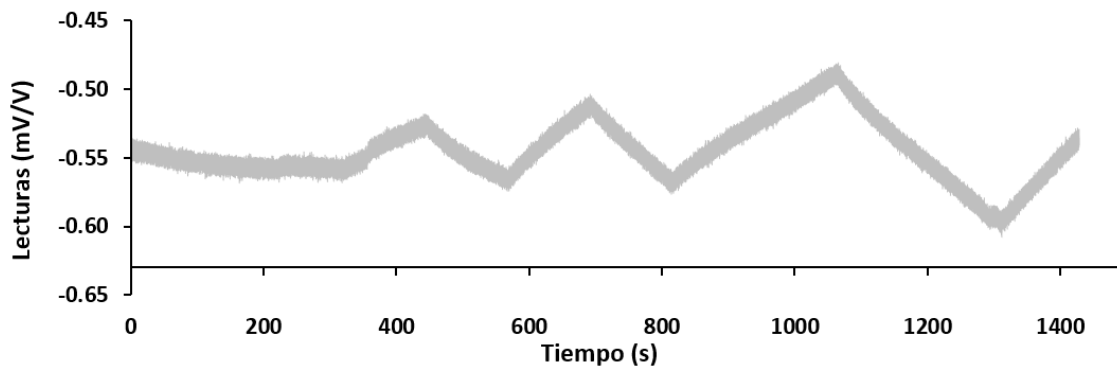


Gráfico 5.4.14 Datos capturados por el BDI (D4115)

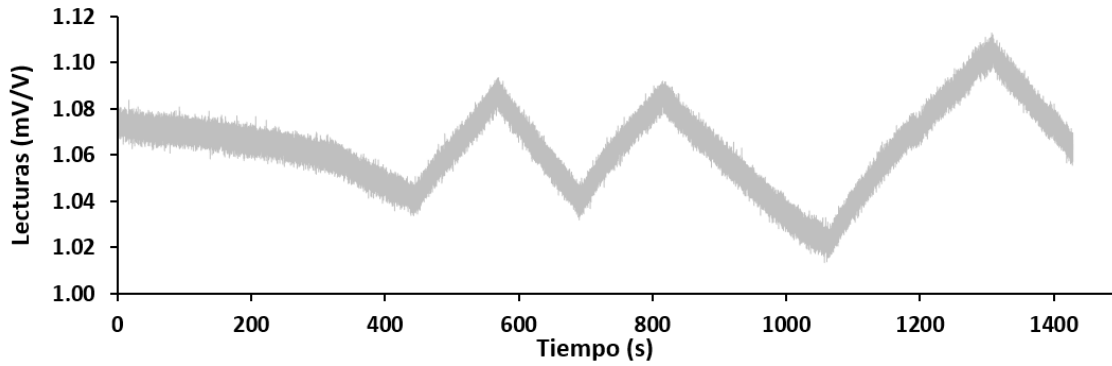


Gráfico 5.4.15 Datos capturados por el BDI (D4145)

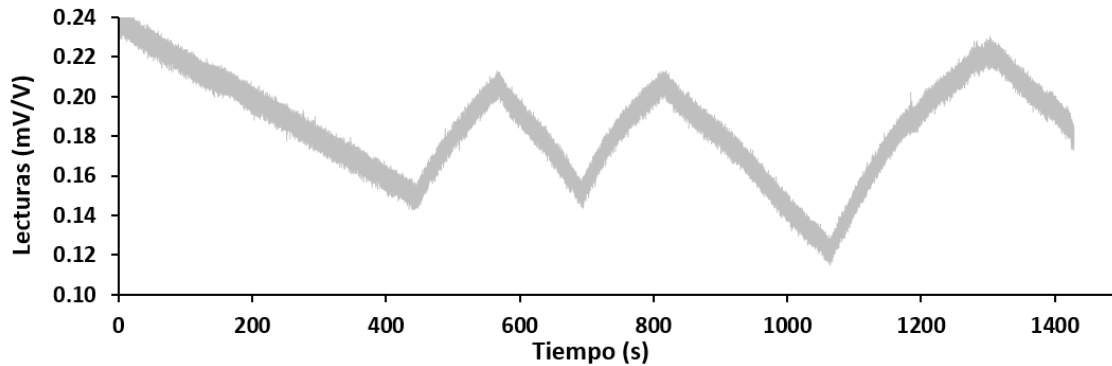


Gráfico 5.4.16 Datos capturados por el BDI (BDI-D3785)

El paso siguiente fue el procesamiento de la información para la obtención de las deformaciones sobre las superficies de estudio.

Se hizo un procedimiento análogo para la obtención de los valores de deformación como se ha especificado en el punto 5.2 en donde al final del capítulo también pueden consultarse los factores de galga.

Comparación entre los valores reportados por los sensores de fibra óptica y deformímetros instalados en los disipadores

Pareja SFO (TS12-035) y BDI (D4145)

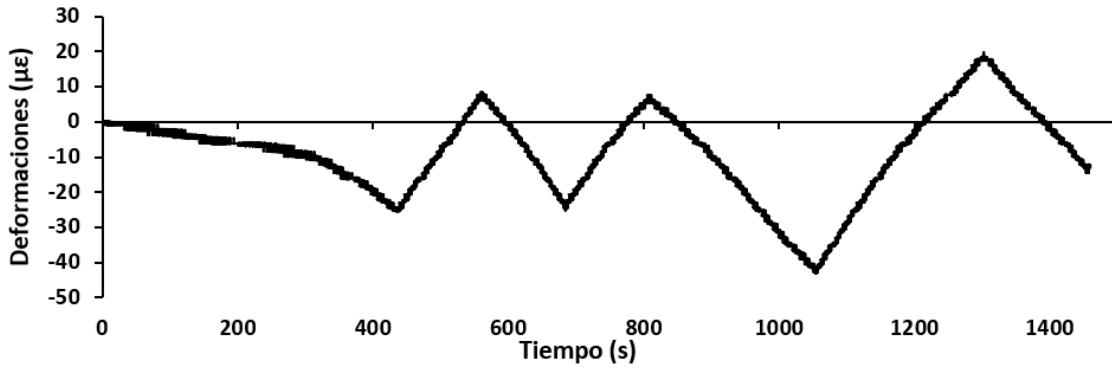


Gráfico 5.4.17 Deformación reportada por el SFO (TS12-035)

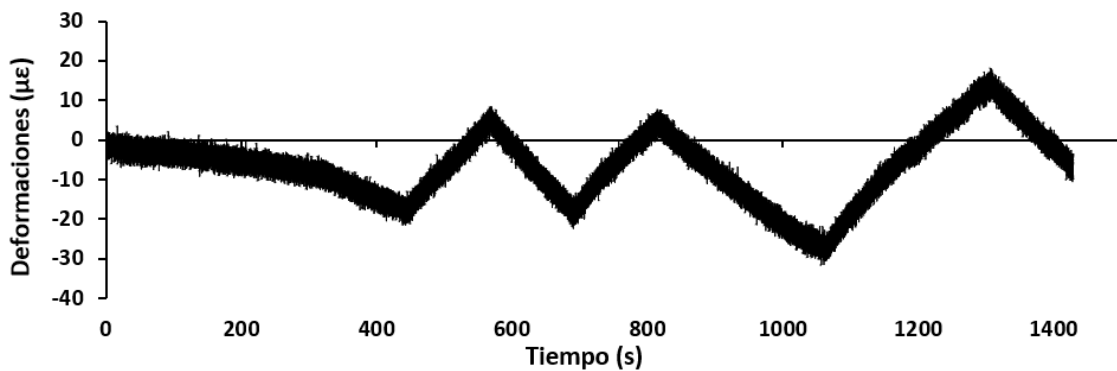


Gráfico 5.4.18 Deformación reportada por el BDI (D4145)

SFO (TS12-036)

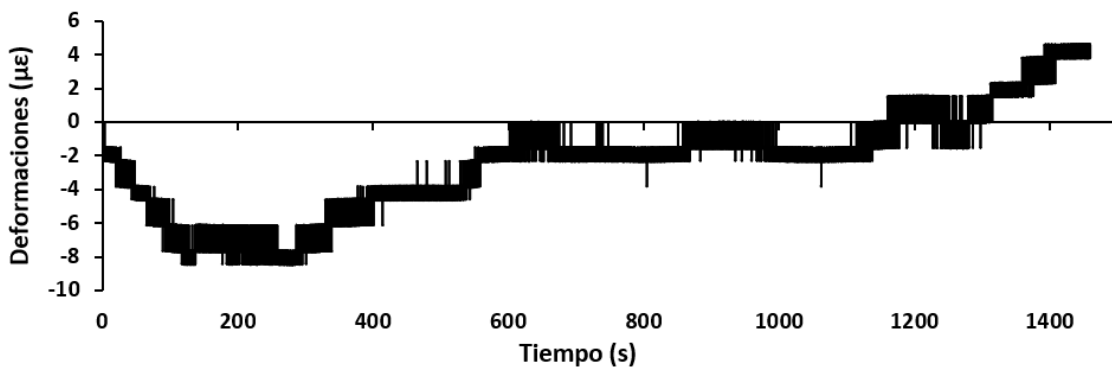


Gráfico 5.4.19 Deformación reportada por el SFO (TS12-036)

Pareja SFO (TS12-038) y BDI (D3785)

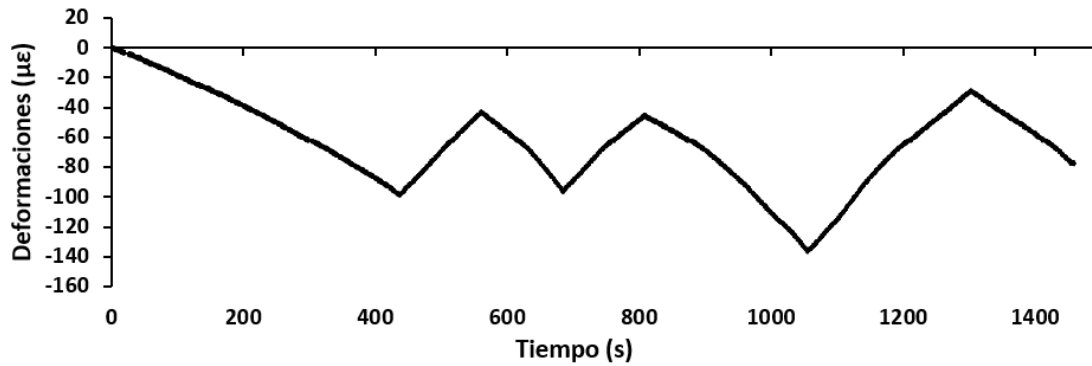


Gráfico 5.4.20 Deformación reportada por el SFO (TS12-038)

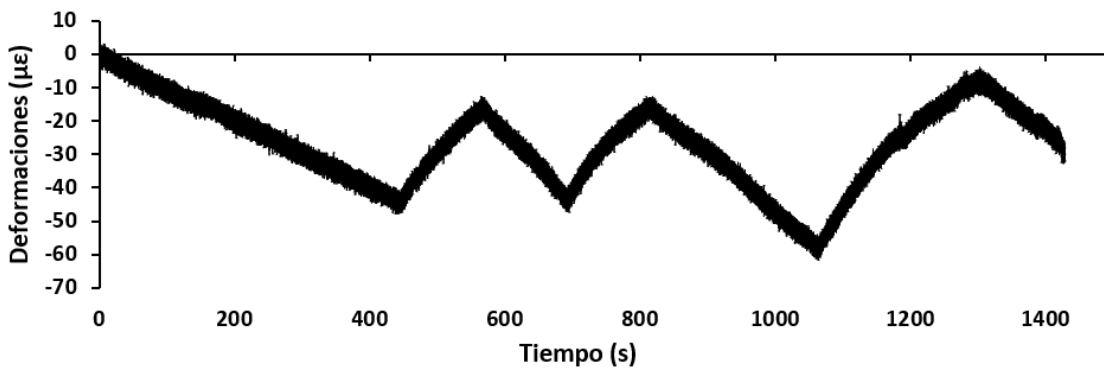


Gráfico 5.4.21 Deformación reportada por el BDI (D3785)

SFO (TS12-040)

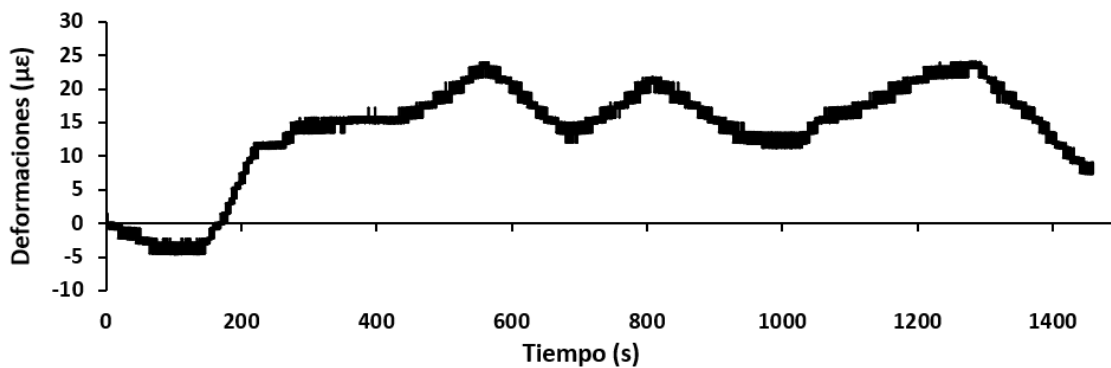


Gráfico 5.4.22 Deformación reportada por el SFO (TS12-040)

Pareja SFO (TS12-041) y BDI (D4115)

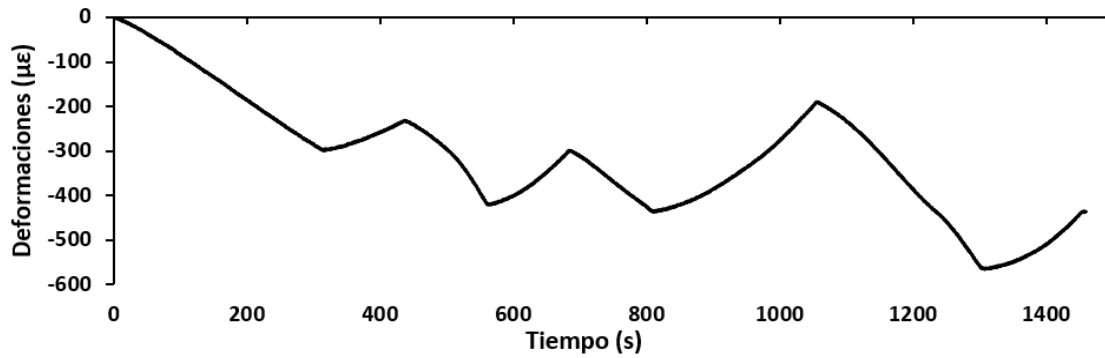


Gráfico 5.4.23 Deformación reportada por el SFO (TS12-041)

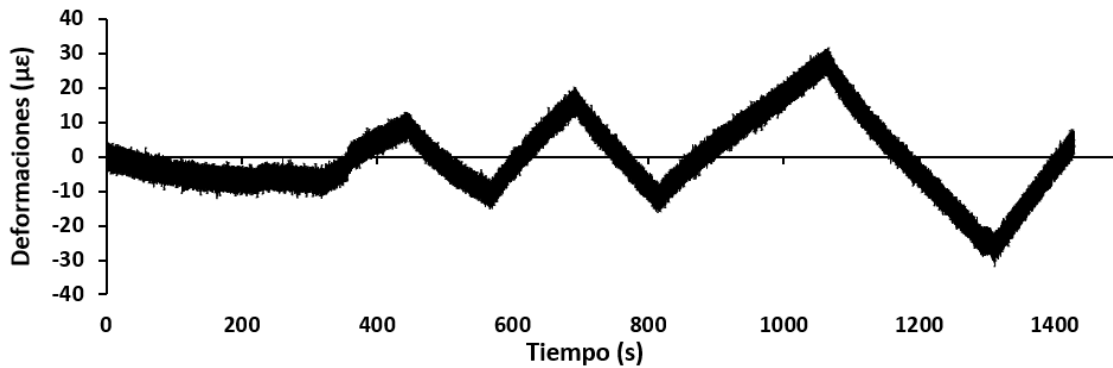


Gráfico 5.4.24 Deformación reportada por el BDI (D4115)

Pareja SFO (TS12-045) y BDI (D4150)

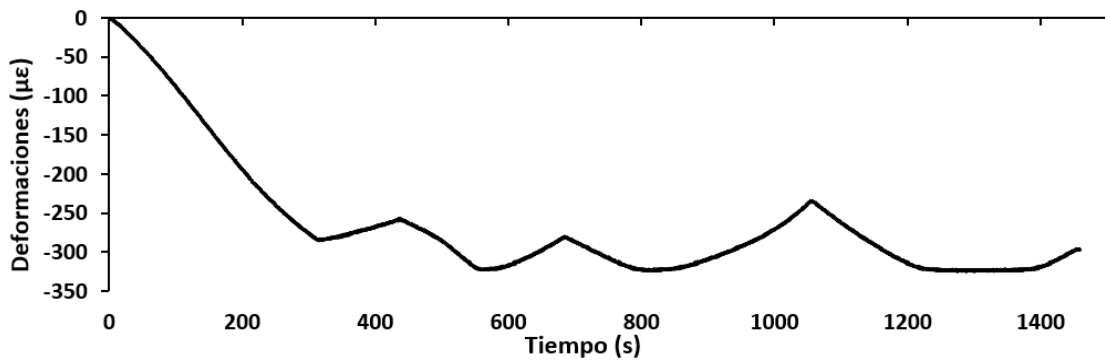


Gráfico 5.4.25 Deformación reportada por el SFO (TS12-045)

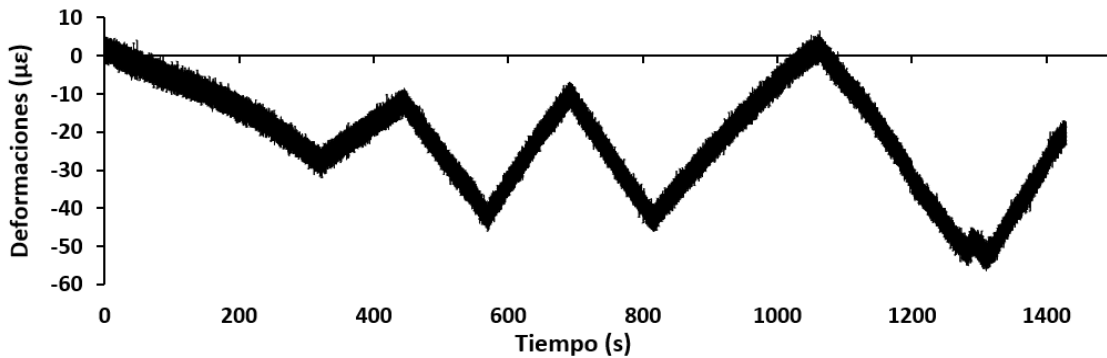


Gráfico 5.4.26 Deformación reportada por el BDI (D4150)

Para poder tener la referencia de la ubicación de los sensores en el muro y poder compararlos, se puede consultar la figura 5.4.4, en donde se hace una identificación de los sensores por colores. En los recuadros se muestra la etiqueta de identificación de los sensores, en la parte superior de cada recuadro la etiqueta de identificación de los SFO y en la parte inferior la etiqueta de los BDI.

Superposición de los valores reportados de deformación para sensores paralelos

Ahora se presenta una comparación gráfica de las deformaciones obtenidas mediante los SFO y los BDI que se encontraban instalados de forma paralela, consultar figura 5.4.4.

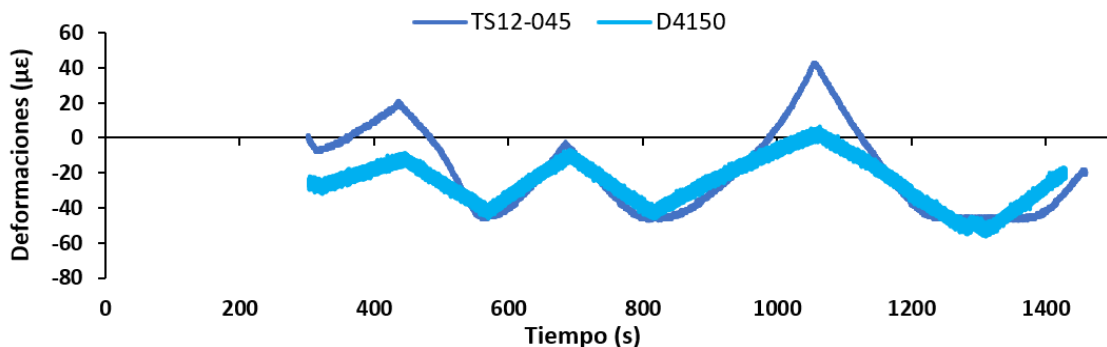


Gráfico 5.4.27 Comparación de SFO (TS12-045) y BDI (D4150)

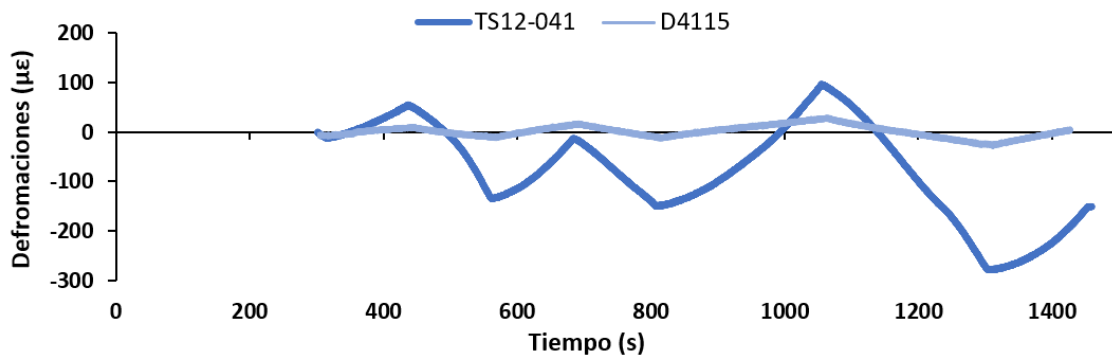


Gráfico 5.4.28 Comparación de SFO (TS12-041) y BDI (D4115)

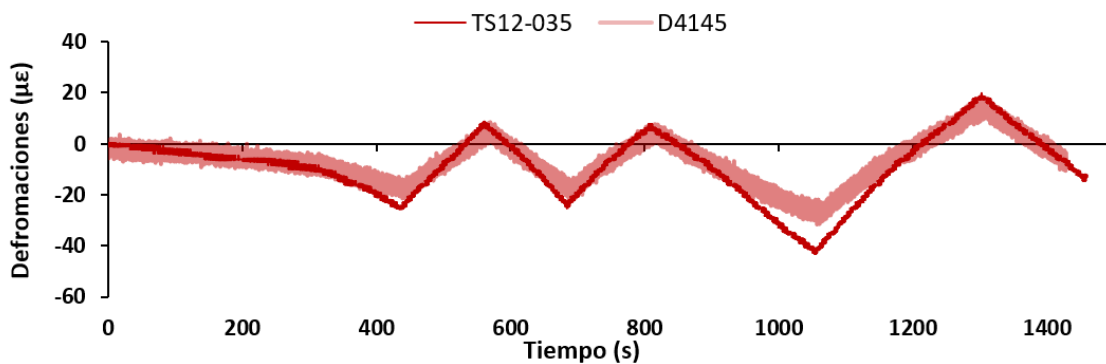


Gráfico 5.4.29 Comparación de SFO (TS12-035) y BDI (D4145)

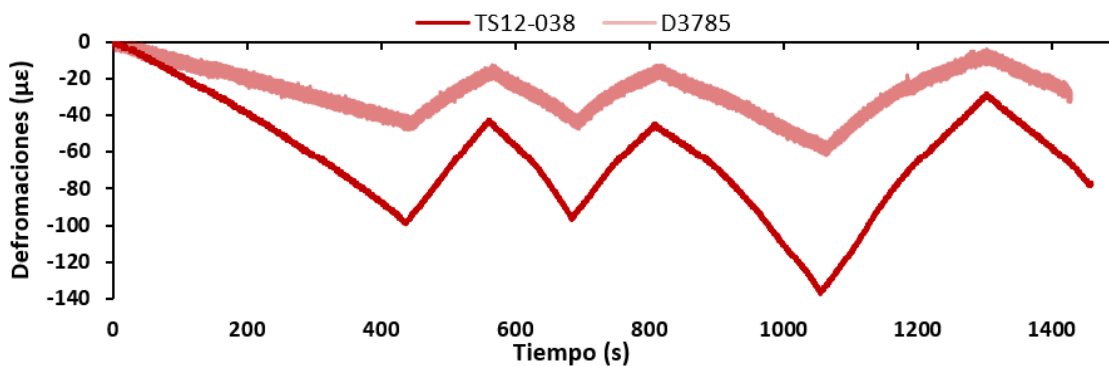


Gráfico 5.4.30 Comparación de SFO (TS12-038) y BDI (D3785)

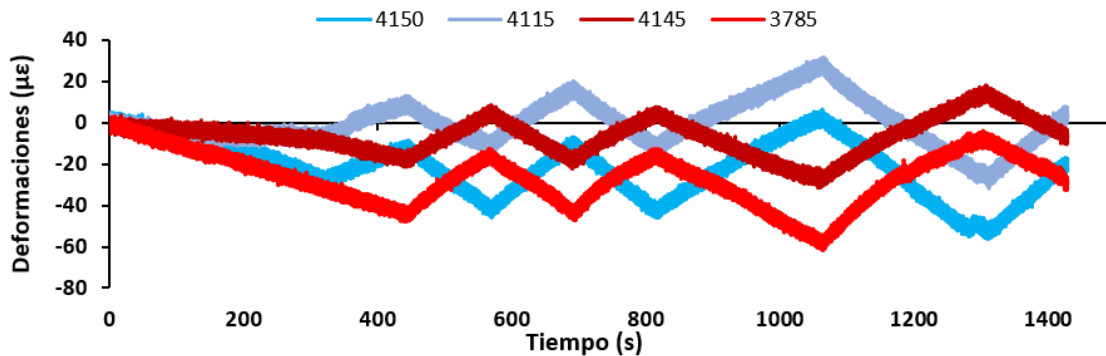


Gráfico 5.4.31 Comparación los cuatro sensores BDI

En los gráficos 5.4.19 y 5.4.22 podemos observar el comportamiento de los sensores TS12-036 y TS12-040, en la figura 5.4.4 se observa que el TS12-040 está colocado cerca de la unión con la zapata y en la parte central del muro, por otra parte, el sensor TS12-036 está colocado en la parte alta del muro, pero también en la parte central. Esto es importante porque el muro fue sometido principalmente a flexión sobre su plano, por lo cual puede inferirse que estos sensores presentan los valores más bajos de deformación debido a que se encuentran cerca del eje neutro del muro.

En los gráficos 5.4.27 y 5.4.30, se observa que ambos sensores siguen la misma tendencia de comportamiento, sin embargo, el SFO reporta valores mayores, posiblemente asociada a su mayor longitud en comparación a sensor BDI.

En el gráfico 5.4.29 se observa un buen desempeño en ambos tipos de sensores, ambos siguen la misma línea y con magnitud de deformación casi idéntica.

Finalmente, con el gráfico 5.4.31 observamos el comportamiento a flexión del muro, pues los sensores en azul estuvieron colocados en el extremo opuesto de donde estaban colocados los sensores en rojo. Es por ello que se observa un comportamiento similar, pero en sentido contrario, es decir mientras los sensores en rojo se comprimían los azules se tensaban.

5.5 Pruebas experimentales en disipadores de energía

Durante el desarrollo de esta tesis, también se tuvo la oportunidad de colaborar en un proyecto de investigación relacionado con el estudio de diversas clases de disipadores de energía sísmica (Guerrero, 2019).

En este apartado se estudia el desempeño que tuvieron los sensores de deformación tipo BDI y los SFO colocados en cuatro diferentes tipos de disipadores de energía, como una instrumentación complementaria a una ya existente. Se hace una breve descripción de experimento y se muestran los resultados de deformación que se obtuvieron.

Cabe señalar que en este trabajo solamente se hace mención a los resultados obtenidos con relación al desempeño de los sensores de deformación durante las pruebas experimentales. El análisis de los resultados relacionados con el comportamiento específico de los disipadores de energía es tema del proyecto de investigación mencionado anteriormente (Guerrero, 2019).

5.5.1 Disipador Tipo 01

5.5.1.1 Descripción del experimento disipador Tipo 01

Esta prueba consistió en aplicar una carga cíclica de tensión y compresión sobre un disipador horizontal que poseía una barra de acero anclada en cada uno de sus extremos tal como se ve en la figura 5.5.1. Este anclaje se realizó con pernos que a su vez se fueron soldados a un perfil tubular (color naranja) de sección cuadrada como se muestra a continuación.

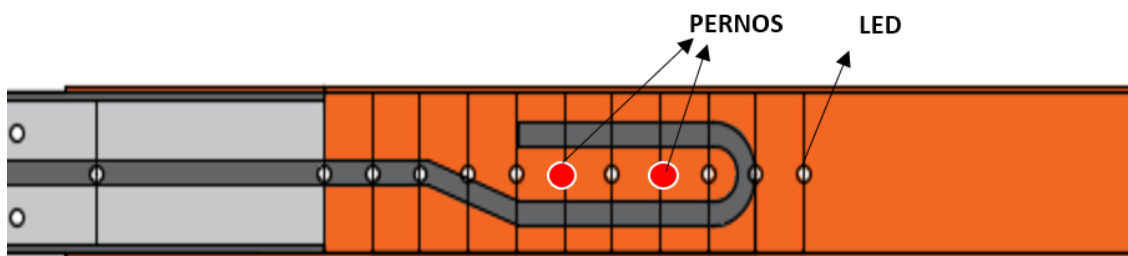


Figura 5.5.1 Anclaje de la barra de acero en el disipador de energía sísmica tipo 01

En la figura 5.5.2 se pueden observar, en color naranja, los dos perfiles metálicos de sección cuadrada, los cuales se encuentran conectados a sus respectivos apoyos mediante tornillos en cada extremo. En la imagen también es posible observar los pernos verticales en donde la barra de acero fue anclada.



Figura 5.5.2 Disipador Tipo 01

En la parte central del disipador se encuentra un perfil tubular de menor sección en color gris (figura 5.5.3), este perfil tiene la función de lograr un traslape con los perfiles tubulares anaranjados (figura 5.5.4). Además, el perfil gris con un relleno de mortero confina y evita el pandeo de la barra metálica. Por consiguiente, el único elemento que trabaja a tensión o a compresión es la barra metálica, los demás elementos cumplirán la función de unión y confinamiento.



Figura 5.5.3 Perfil relleno de mortero para confinar la barra metálica

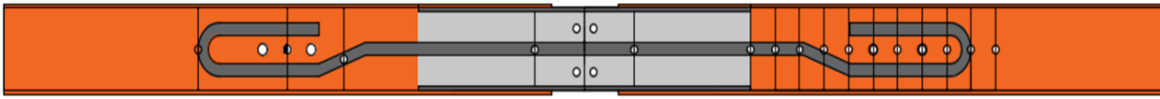


Figura 5.5.4 Corte longitudinal del dissipador Tipo 01, se observa el traslape entre el perfil de concreto y los perfiles metálicos

La carga se aplicó mediante un actuador horizontal (figura 5.5.5), haciendo ciclos de carga axial.



Figura 5.5.5 Actuador 1 horizontal

Se realizaron dos etapas de carga, la primera etapa consistió en una serie de ciclos de tensión y compresión con una tendencia en aumento en cuanto a magnitud (gráfico 5.5.1).

La segunda etapa, llamada etapa de fatiga, consistió en aplicar tensión y compresión sin aumentar la carga máxima (gráfico 5.5.3), hasta que el elemento barra fallara.

Para entender la prueba de mejor manera a continuación se presenta la historia de carga del actuador para las 2 etapas (gráficos 5.5.1 y 5.5.3) y sus respectivos desplazamientos (gráficos 5.5.2 y 5.5.4) a través del tiempo.

Etapa 01

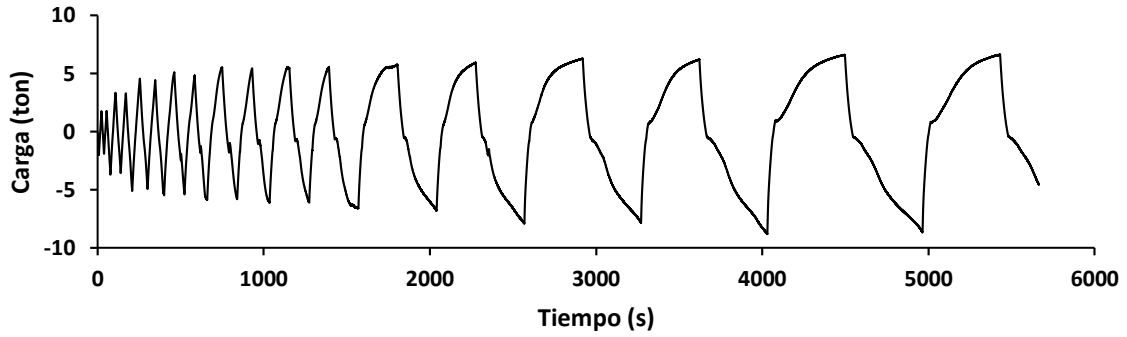


Gráfico 5.5.1 Historia de carga del actuador (Etapa 01)

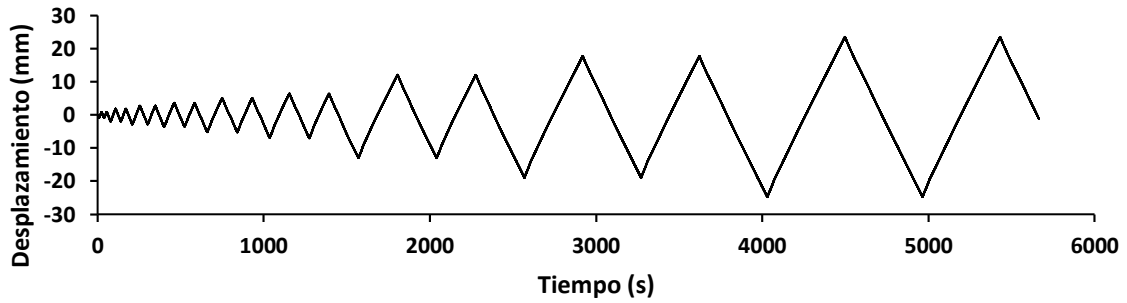


Gráfico 5.5.2 Desplazamiento del actuador (Etapa 01)

Etapa 02

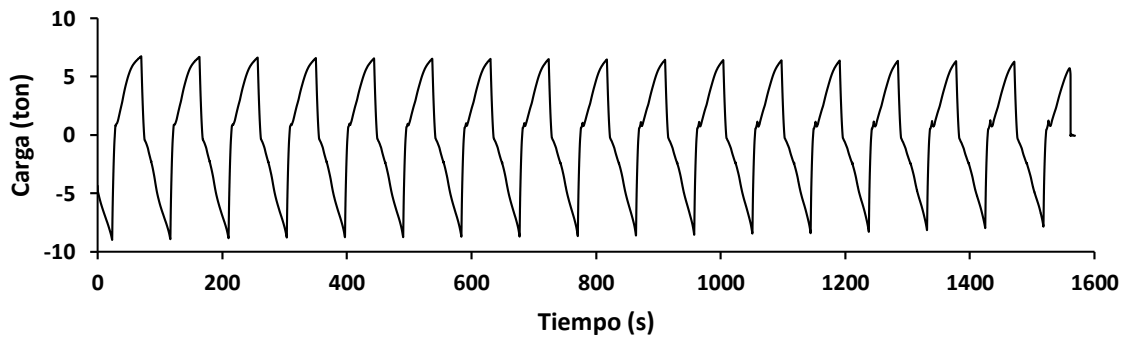


Gráfico 5.5.3 Historia de carga del actuador (Etapa 2)

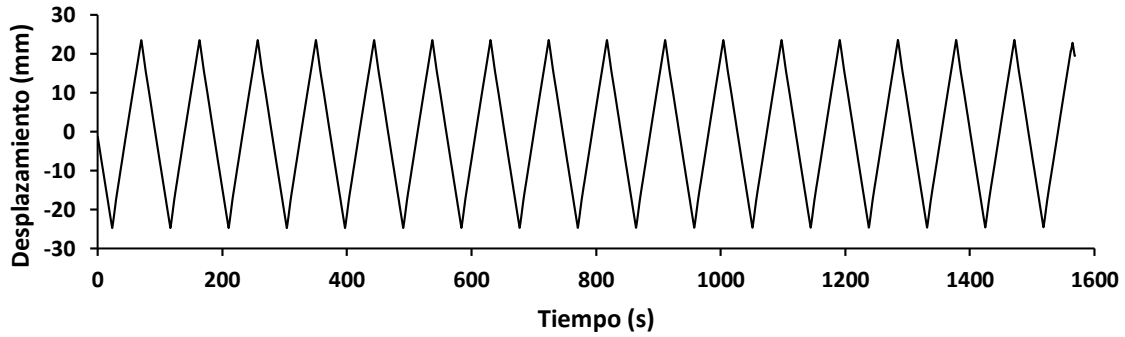


Gráfico 5.5.4 Desplazamiento del actuador (Etapa 02)

5.5.1.2 Instrumentación del disipador Tipo 01

La instrumentación se realizó de acuerdo con los procedimientos indicados en el capítulo 5.1 de la presente tesis.

En este experimento se usaron dos sensores de fibra óptica (TS12-043 y TS12-044) mostrados en la figura 5.5.6 y para la prueba se contaron con 20 sensores de desplazamiento tipo LED (figura 5.5.7) que capturaban datos en 3 direcciones ortogonales, los cuales fueron monitoreados mediante una cámara y estuvieron a cargo de los responsables del experimento.



Figura 5.5.6 Sensores TS12-043 y TS12-044



Figura 5.5.7 Ubicación de sensores LED

Los SFO se colocaron de tal forma que el centro del sensor coincidiera con la sección transversal en donde se colocó el LED #16 como se muestra en la figura 5.5.8.

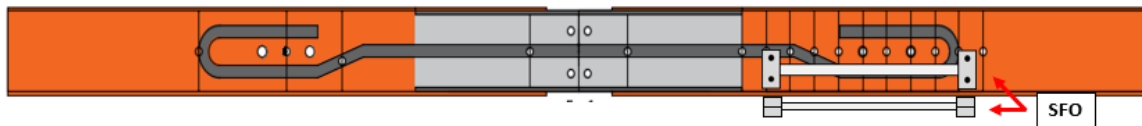


Figura 5.5.8 Ubicación de los SFO TS12-044 y TS12-043

Por otra parte, los sensores LED #13 y #19 fueron de especial interés, ya que se encuentran en las mismas secciones transversales del perfil anaranjado en donde están colocadas las bases de los sensores de fibra óptica (Figura 5.5.9).

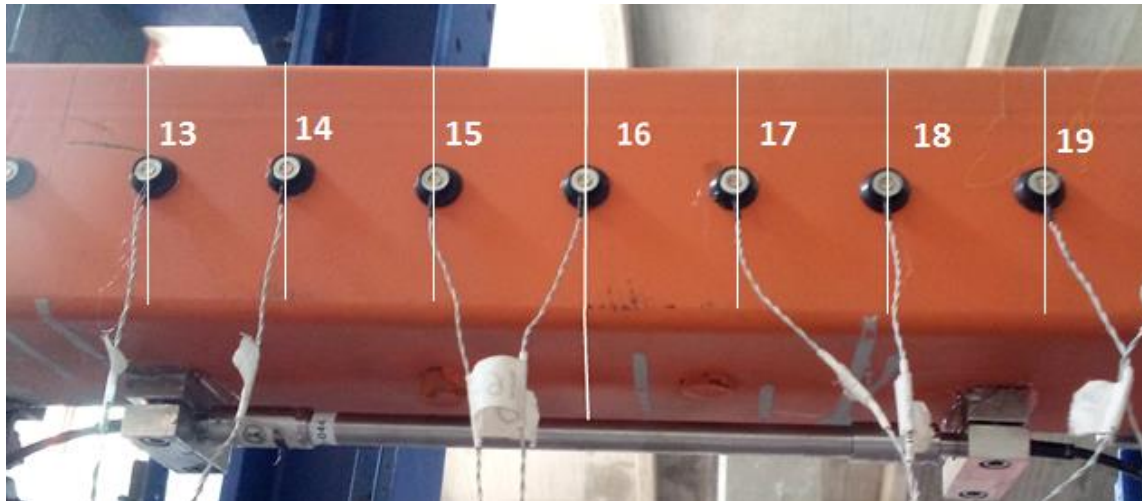


Figura 5.5.9 Sección transversal de interés y sensores de interés

Para la colocación de los dos sensores de fibra óptica se siguió el procedimiento del capítulo 5.1, y a grandes rasgos fue:

- Se lijó la superficie donde se colocaron las bases de fibra óptica, así como la superficie de las bases de los sensores.
- Con acetona se removieron los residuos que dejamos al lijar.
- Con ayuda de un pegamento epóxico se fijaron los dos sensores.



Figura 5.5.10 Colocación de sensores de fibra óptica

5.5.1.3 Análisis e interpretación de resultados del disipador Tipo 01

La prueba tuvo una duración aproximada de una 01:30 para la etapa 1 y de 25 minutos para la etapa 2. El intervalo de muestreo para los SFO y para los sensores LED se estableció a cada 0.1 s.

La información obtenida a partir de los LEDs, fueron desplazamientos en tres direcciones ortogonales X, Y y Z, en este caso la dirección de interés fue la dirección Y (figura 5.5.12), pues en esta dirección se aplicó la fuerza y también es la dirección en la que estuvieron orientados los SFO.

Por otra parte, se observó que los sensores LED #13 y #19 son los sensores que sirvieron de apoyo en esta prueba para comparar con los sensores de fibra óptica, estos sensores estuvieron ubicados en la misma sección transversal que las bases los SFO, por lo cual al analizar los desplazamientos del LED 13 y el LED 19, serán de utilidad.

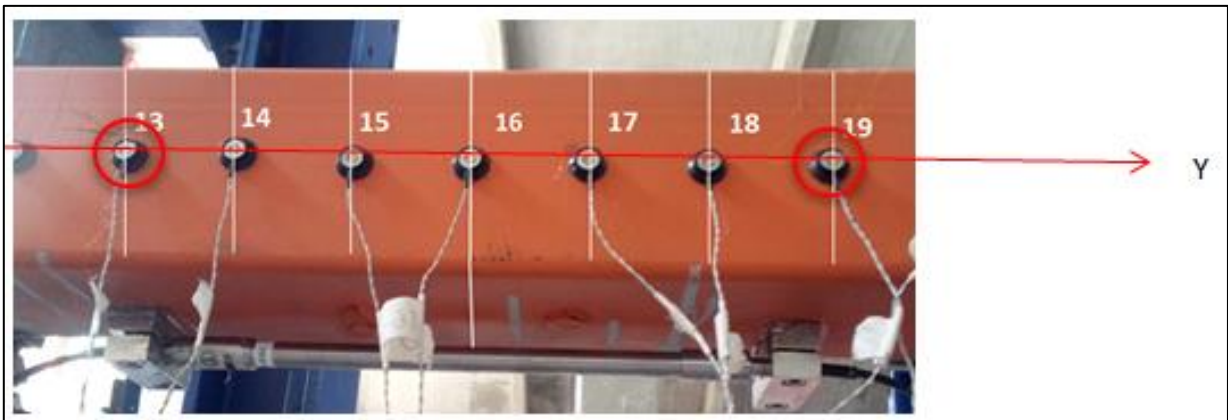


Figura 5.5.12 Segmento y sensores de interés

Obtención de deformación unitaria en base a los sensores LED

Para la obtención de las deformaciones unitarias con los LED, nos basamos en la definición de deformación.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (5.5.1)$$

Donde:

ε Es la deformación unitaria que ocurre entre el LED 13 y el LED 19.

ΔL Es el cambio de longitud del segmento de perfil tubular en cierto instante de la prueba

L Es la longitud inicial del segmento de perfil tubular, en este caso, la longitud inicial es 305 (mm).

A manera de ejemplo se obtendrá la deformación unitaria para cualquier instante de tiempo. Partiendo de la ubicación de los leds para cada instante.

La dirección de interés es la dirección Y, para obtener la ubicación ajustada a cero de los LEDs, restaremos a cada valor de desplazamiento el valor inicial, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5.5.1 Ajuste de las lecturas obtenidas por los sensores LED

Lecturas sensores LED		
Número de lectura	Lecturas	
	Obtenidas	Ajustadas
	(mm)	(mm)
0	Y_0	$Y_0 - Y_0$
1	Y_1	$Y_1 - Y_0$
2	Y_2	$Y_2 - Y_0$
3	Y_3	$Y_3 - Y_0$
...
...
n	Y_n	$Y_n - Y_0$

Ahora que se tiene la ubicación de ambos LEDs ajustada a cero para cada instante, se obtiene el cambio de longitud del segmento de perfil tubular.

$$\Delta L_i = Y_{LED19 t=i} - Y_{LED13 t=i}$$

El procedimiento se ejemplifica en la figura mostrada a continuación:

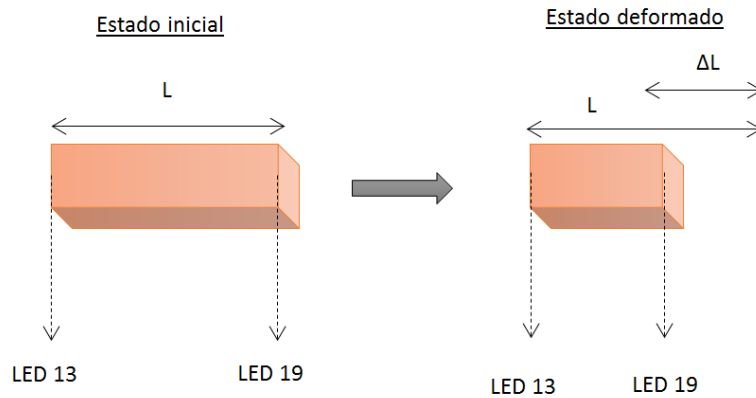


Figura 5.5.13 Deformación del segmento de perfil

Finalmente se procede a obtener la deformación unitaria mediante la expresión 5.5.2.

Información capturada por los sensores de fibra óptica y los sensores de desplazamiento tipo LED

Los datos capturados por los sensores de fibra óptica se muestran a continuación:

Etapa 01

La información capturada por los sensores de fibra óptica:

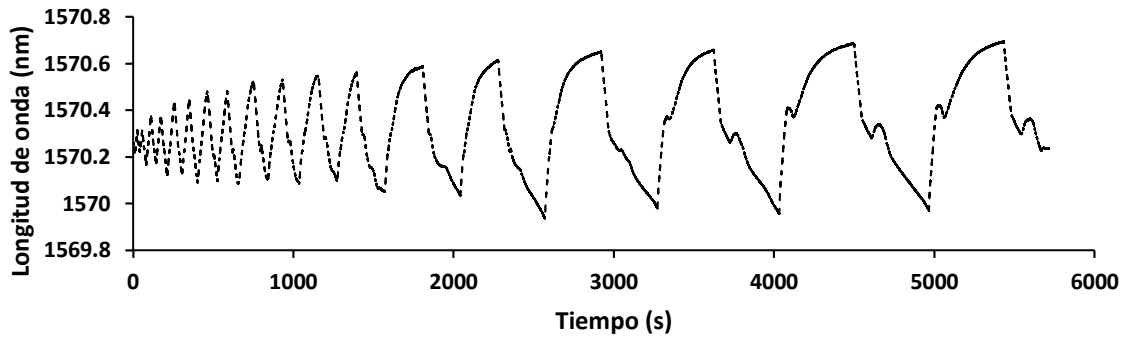


Gráfico 5.5.5 Datos capturados por el SFO (TS12-043)

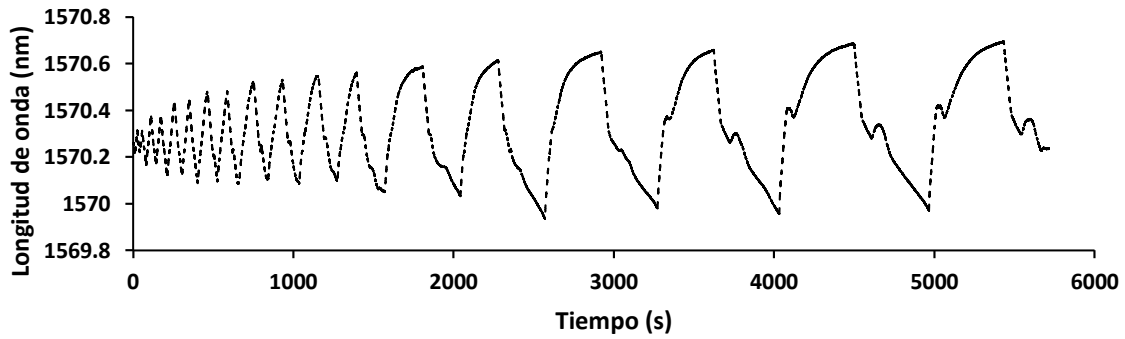


Gráfico 5.5.6. Datos capturados por el SFO (TS12-044)

Los datos capturados por los sensores LED se muestran a continuación:

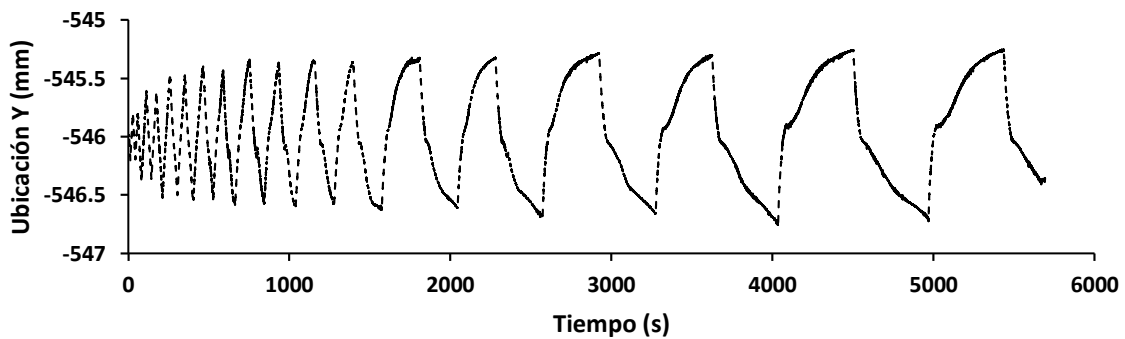


Gráfico 5.5.7 Etapa 01 - Datos capturados por el LED 13

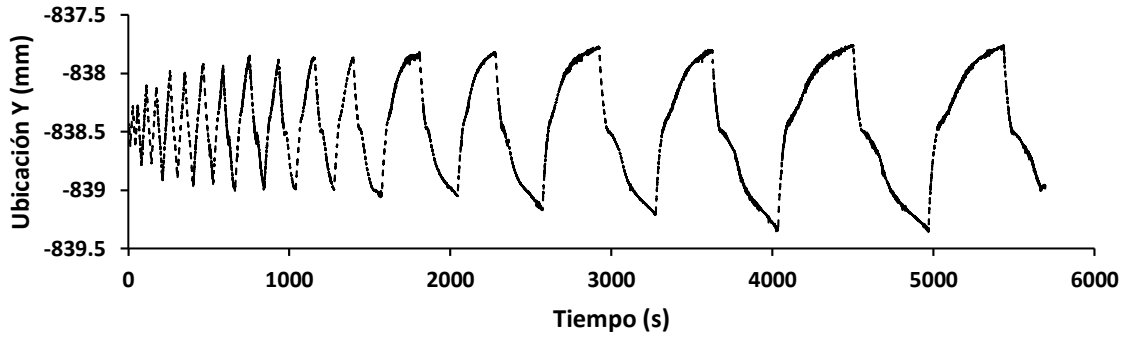


Gráfico 5.5.8 Etapa 01 - Datos capturados por el LED 19

Etapa 02

La información capturada por el sensor de fibra óptica:

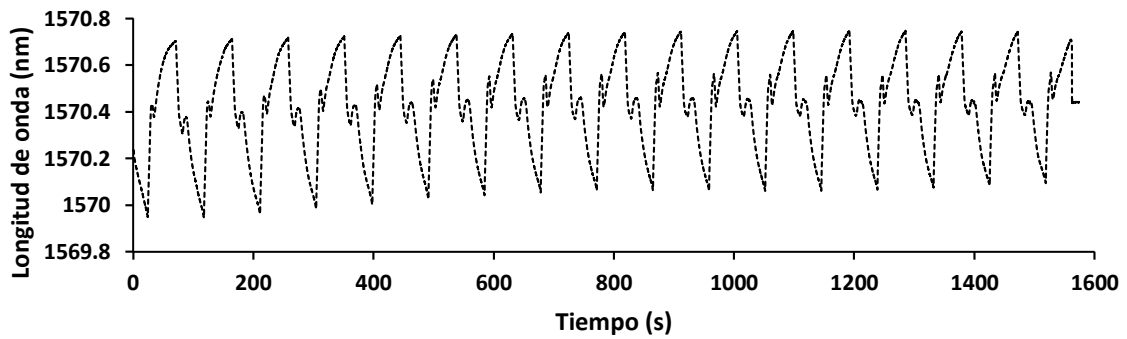


Gráfico 5.5.9 Etapa 02- Datos capturados por el SFO (TS12-043)

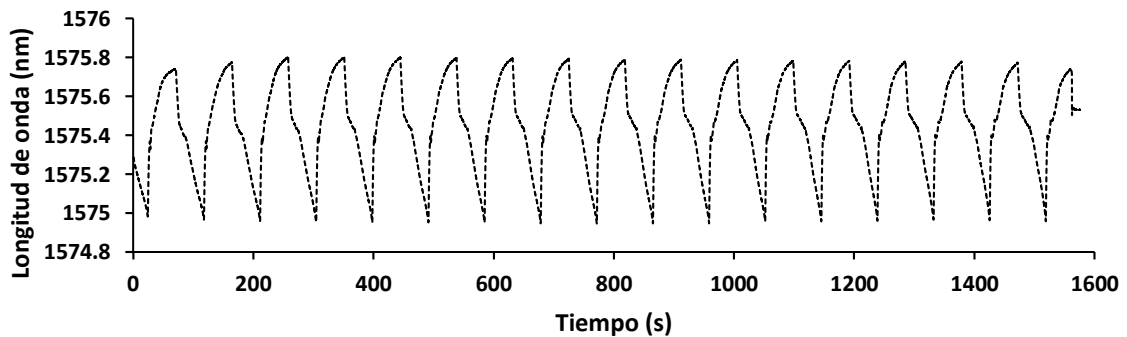


Gráfico 5.5.10 Etapa 02 - Datos capturados por el SFO (TS12-044)

Los datos capturados por los sensores LED se muestran a continuación:

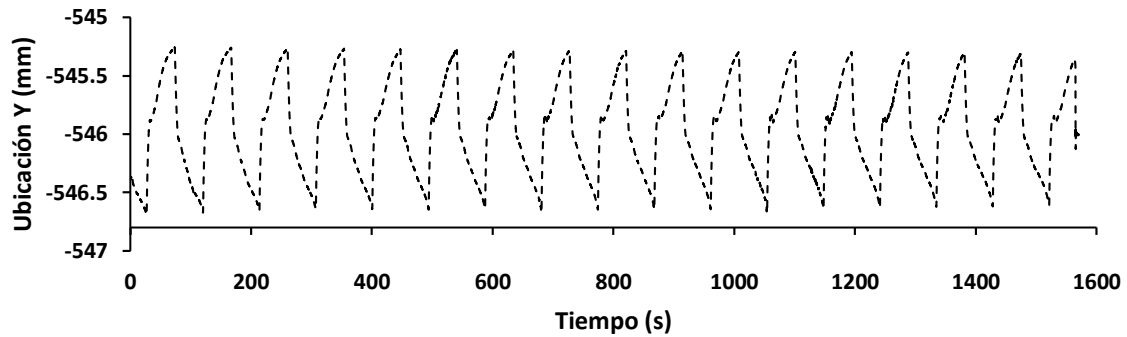


Gráfico 5.5.11 Etapa 02 - Datos capturados por el LED 13

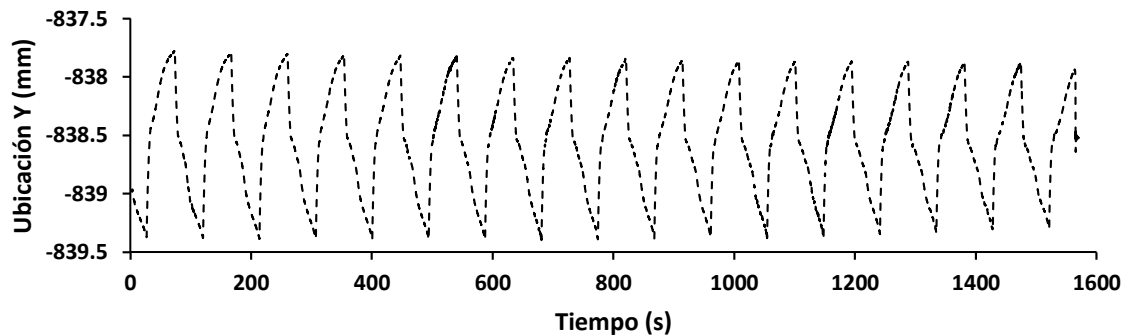


Gráfico 5.5.12 Etapa 02 - Datos capturados por el LED 19

El siguiente paso fue el procesamiento de la información para la obtención de las deformaciones sobre las superficies de estudio.

Se siguió el procedimiento análogo para la obtención de los valores de deformación como se ha especificado en la sección 5.2. Los factores de conversión pueden consultarse en la tabla 5.3 también de la sección 5.2.

Comparación entre los valores reportados por los sensores de fibra óptica y el sistema de LEDs

Etapa 01

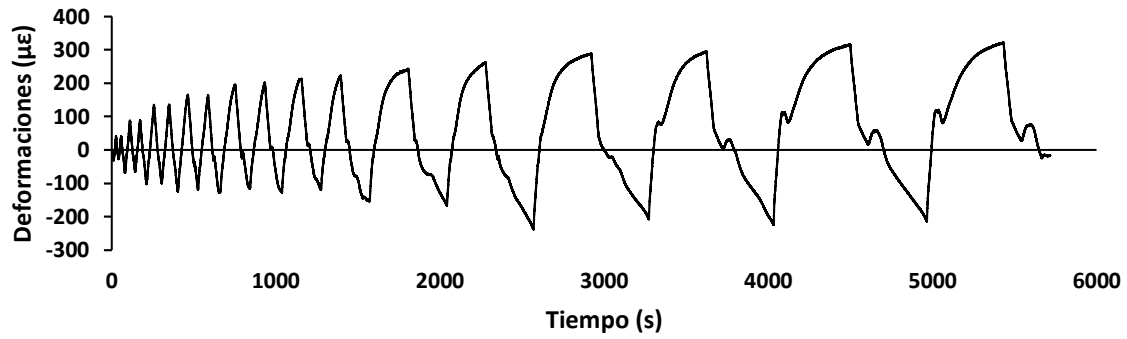


Gráfico 5.5.13 Etapa 01 - Deformaciones reportadas por el SFO (TS12-043)

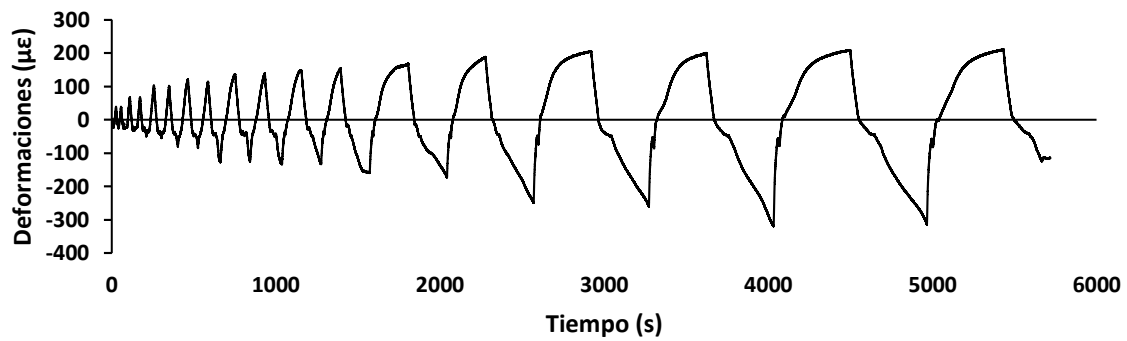


Gráfico 5.5.14 Etapa 01 - Deformaciones reportadas por el SFO (TS12-044)

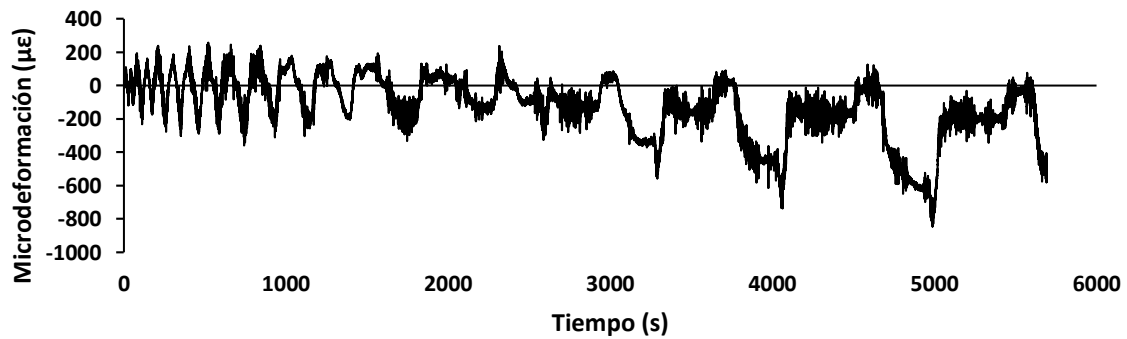


Gráfico 5.5.15 Etapa 01 - Deformaciones obtenidas por LEDs

Etapa 02

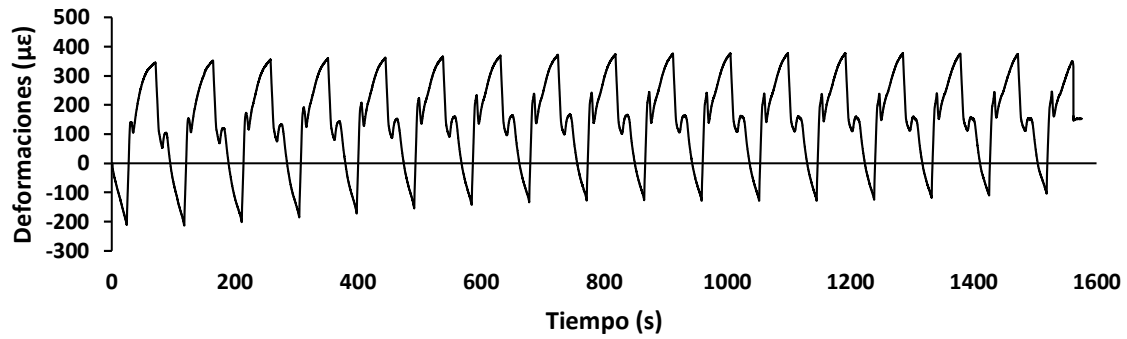


Gráfico 5.5.16 Etapa 02 deformaciones obtenidas por el SFO (TS12-043)

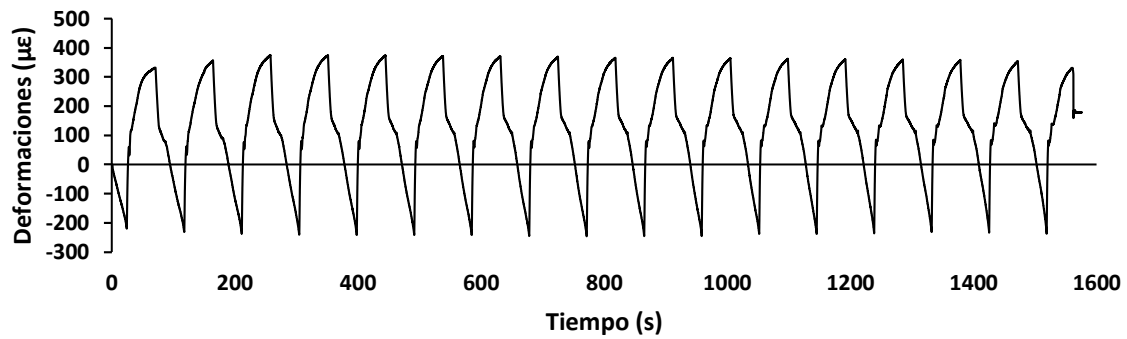


Gráfico 5.5.17 Etapa 02 deformaciones obtenidas por el SFO (TS12-044)

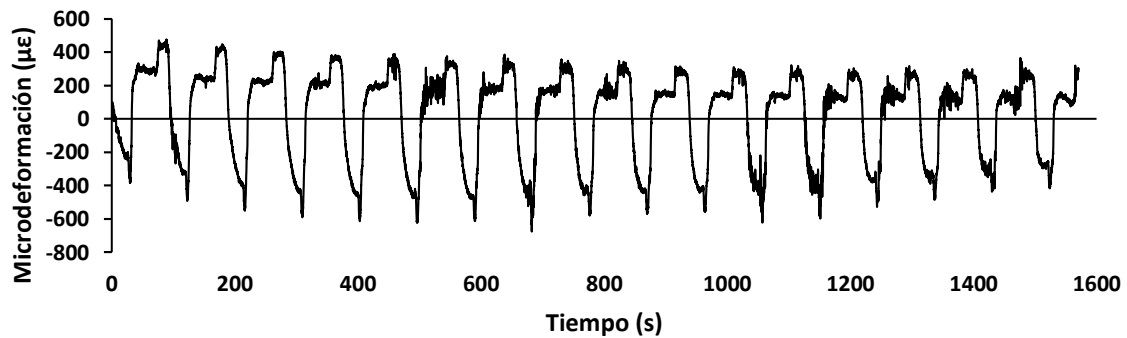


Gráfico 5.5.18 Etapa 2 - Deformaciones obtenidas por LEDs

Superposición de los valores reportados de deformación para sensores sobre la misma superficie

A continuación, se presenta una comparación gráfica de las deformaciones obtenidas mediante los SFO y los LEDs.

Etapa 01

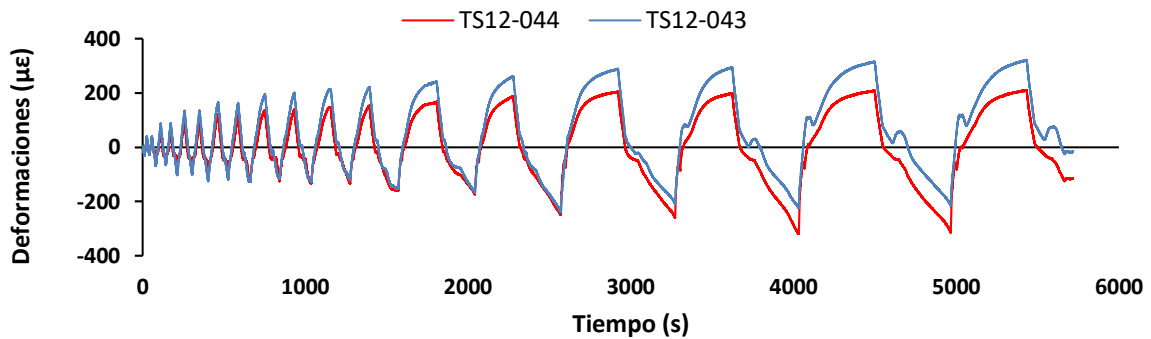


Gráfico 5.5.19 Etapa 1 - Comparación de deformaciones SFO TS12-044 y TS12-043

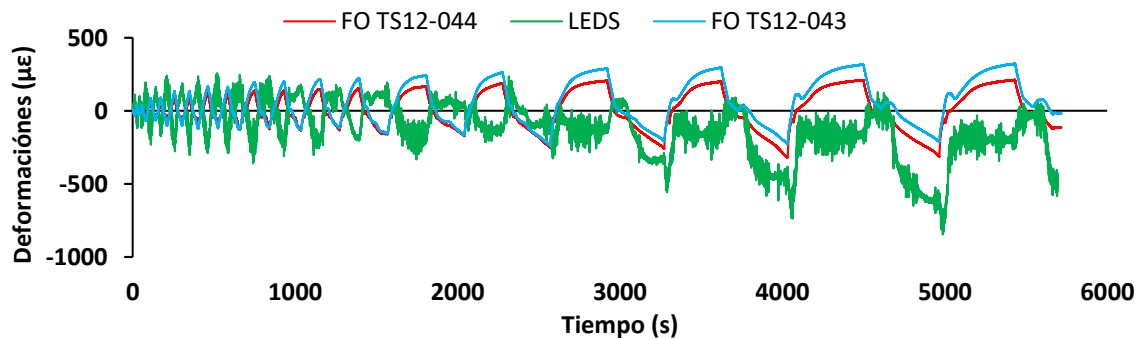


Gráfico 5.5.20 Etapa 1 - Comparación gráfica de los tres sensores

Etapa 02

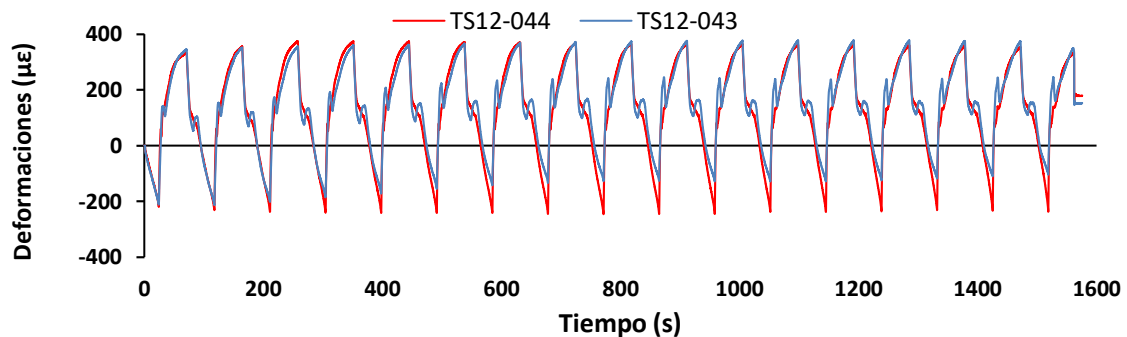


Gráfico 5.5.21 Etapa 2 - Comparación de deformaciones SFO TS12-044 y TS12-043

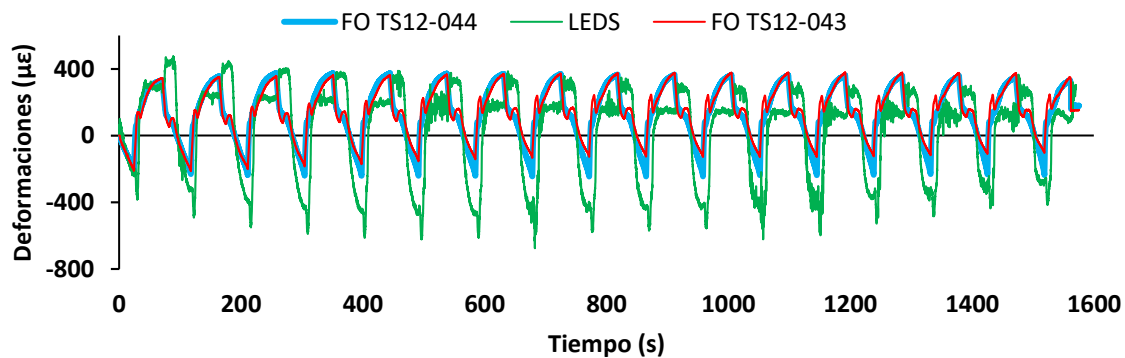


Gráfico 5.5.22 Etapa 2 – Comparación gráfica de los tres sensores

Los comentarios del desempeño de los sensores, son:

Al tratarse de una prueba de carga axial, en los gráficos 5.5.19 y 5.5.21 se observa un excelente comportamiento de los SFO, pues siguen casi la misma tendencia a pesar de que estuvieron colocados en diferentes caras del dissipador. La adherencia de los SFO a la superficie del dissipador fue muy buena, esto lo podemos observar en el gráfico 5.5.21 ya en la etapa de fatiga casi cumplidas dos horas de prueba, se observa un comportamiento uniforme y muy similar al desplazamiento del actuador, además no se observan cambios bruscos en las lecturas.

Comparando los resultados mostrados en las figuras 5.5.20 y 5.5.22 se observa que existe congruencia entre los valores de deformación arrojados por los sensores LED, los valores de los SFO y a su vez ambos siguen la misma tendencia que el desplazamiento del actuador. Sin embargo, destaca la calidad de la información obtenida a través de los SFO con relación a la obtenida mediante los LEDES.

5.5.2 Disipador Tipo 02

5.5.2.1 Descripción del experimento disipador Tipo 02

La prueba del disipador de energía sísmica tipo 02 consistió en la aplicación de carga axial de manera vertical (figura 5.5.14), con el objetivo de obtener información acerca de su comportamiento y del desempeño de los sensores instalados.

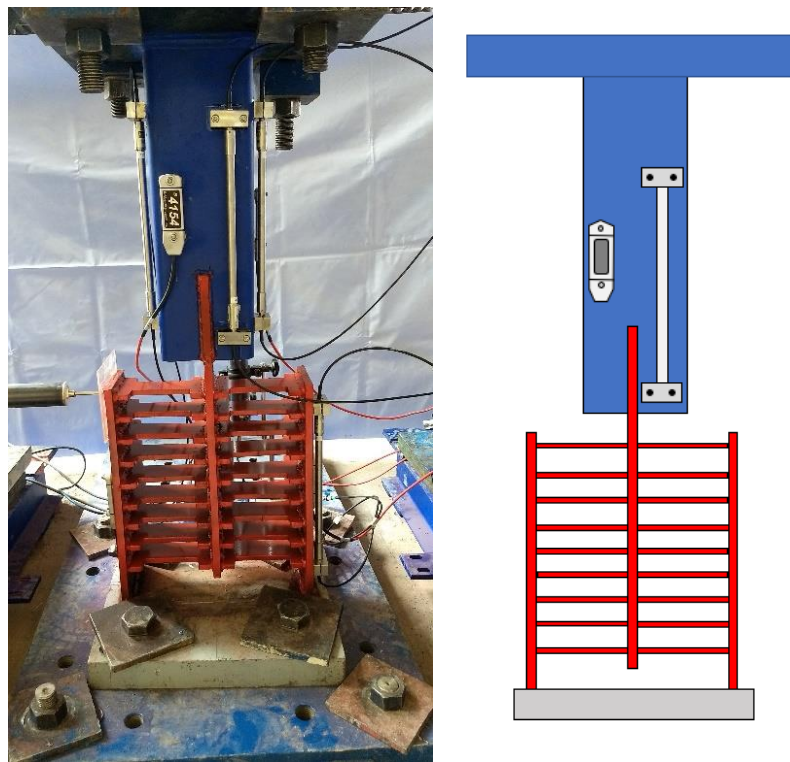


Figura 5.5.14 Disipador de energía sísmica tipo 02

Para entender la prueba de mejor manera, a continuación, se presenta la historia de carga del actuador (gráfico 5.5.23) y su desplazamiento (gráfico 5.5.24) a través del tiempo.

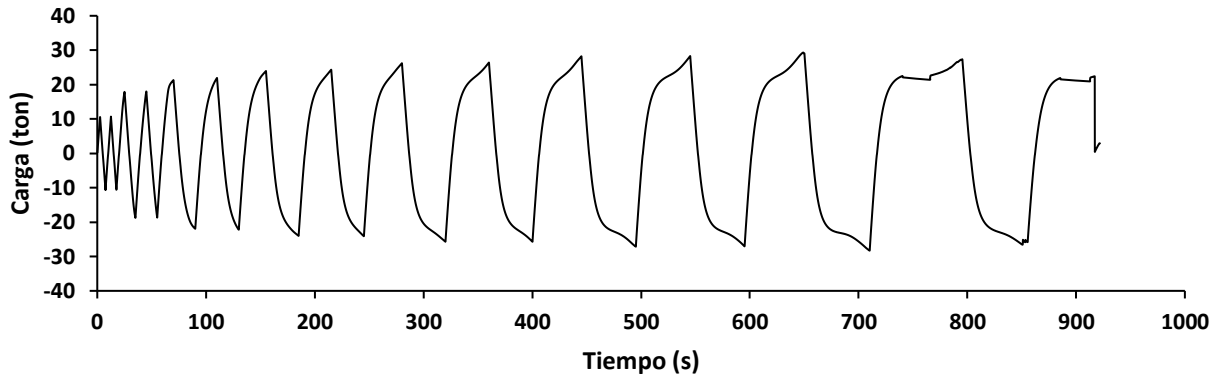


Gráfico 5.5.23 Historia de carga del actuador

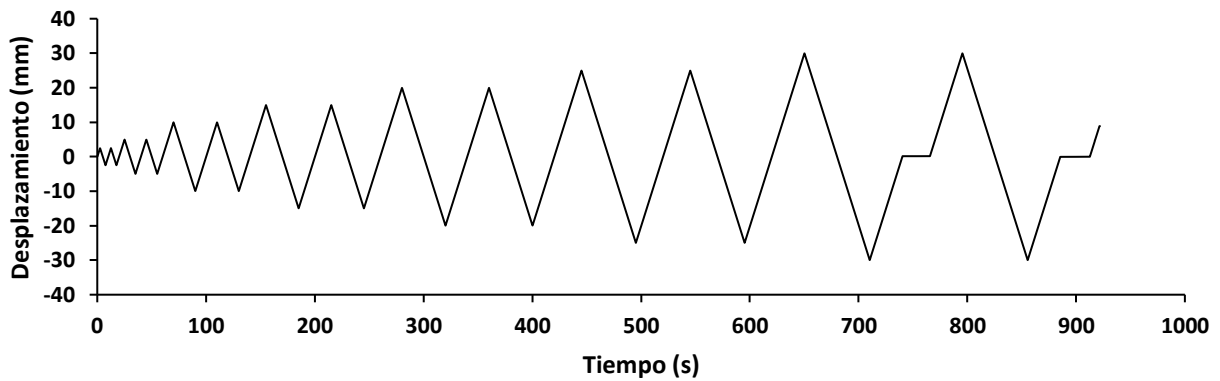


Gráfico 5.5.24 Desplazamiento del actuador

El actuador aplicó diferentes ciclos de carga, en los cuales se pudo apreciar la deformación de las placas laterales y las placas transversales hasta el momento en el que se presentó la falla. El comportamiento general de la prueba se puede apreciar en la figura 5.5.15 pues puede observarse el desplazamiento vertical de uno de los extremos de las placas laterales. Además, es posible observar algunos SFO y deformímetros BDI.

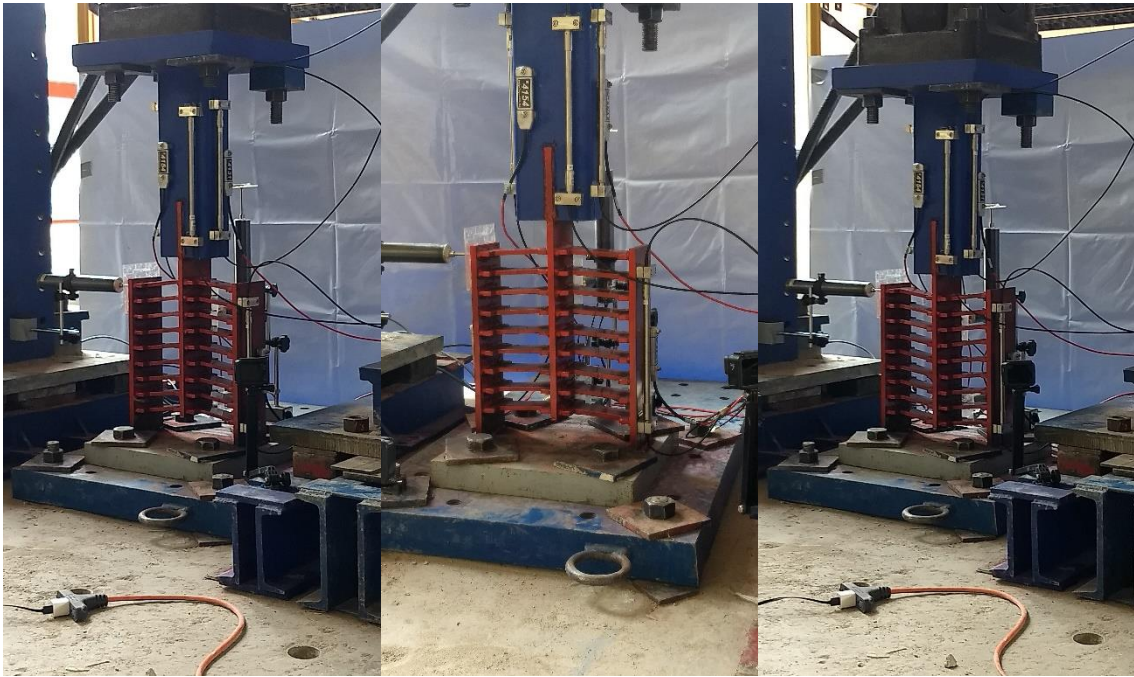


Figura 5.5.15. Comportamiento del disipador de energía tipo 02 durante la prueba

5.5.2.2 Instrumentación del disipador Tipo 02

En esta prueba se hizo uso de cuatro sensores de fibra óptica (TS12-036, TS12-041, TS12-043 y TS12-044) y de cuatro sensores BDI (D4131, D4130, D4123 y D154), cuya distribución en el experimento se muestra a continuación.

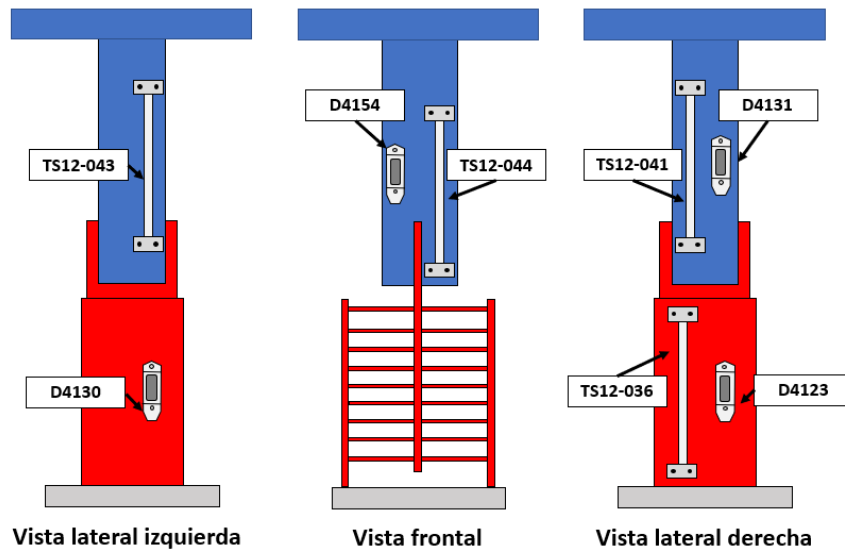


Figura 5.5.16 Esquema del disipador y localización de los diversos tipos de sensores instalados

Los SFO y los BDI fueron instalados de tal manera que no se interfiriera con la instrumentación original del experimento, pero con la posibilidad de hacer comparaciones posteriores entre la información obtenida con los diferentes sensores (figuras 5.5.16 y 5.5.17). Para que esto fuera posible, en algunos casos se instaló junto a un SFO un BDI y en otros casos se buscó simetría en la instrumentación como se observa con el sensor TS12-041 (vista lateral derecha, figura 5.5.16) teniendo simetría con el sensor TS12-043 (vista lateral izquierda, figura 5.5.16).

La colocación de los instrumentos (figura 5.5.17) se realizó de acuerdo con los procedimientos indicados en la sección 5.1 de la presente tesis.



Figura 5.5.17 Instalación de los instrumentos de medición sobre el disipador de energía.

En la figura 5.5.17 se presenta el procedimiento de instalación de los diferentes sensores. Cabe mencionar que la superficie donde se adhirieron estos sensores, presentaba ciertas rugosidades, lo cual debe tomarse en cuenta más adelante para la interpretación de los resultados.

5.5.2.3 Análisis e interpretación de resultados del disipador Tipo 02

La prueba realizada tuvo una duración aproximada de 20 minutos. El intervalo de muestreo para los SFO se estableció a cada 0.10 s y para los BDI a cada 10 s.

Se dio por terminada la prueba cuando se llegó a la falla de la unión de la placa lateral izquierda con la placa base, como se puede apreciar en la figura 5.5.18.

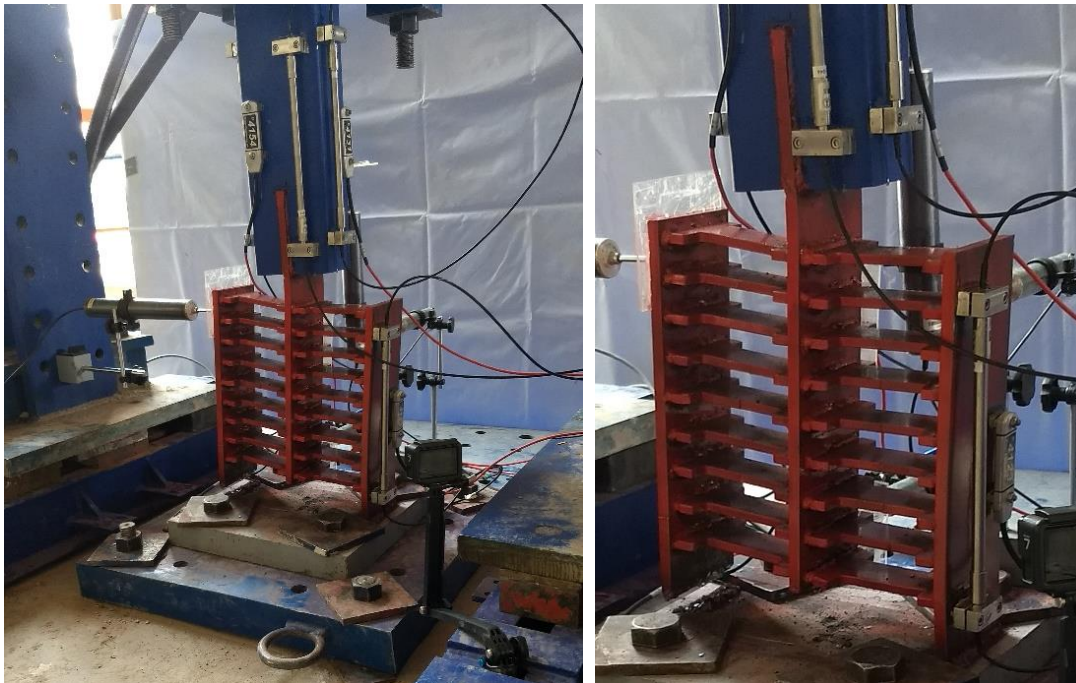


Figura 5.5.18 Estado del disipador al final de la prueba

Información capturada por los sensores de fibra óptica y sensores BDI

Los datos capturados por los sensores de fibra óptica se muestran a continuación:

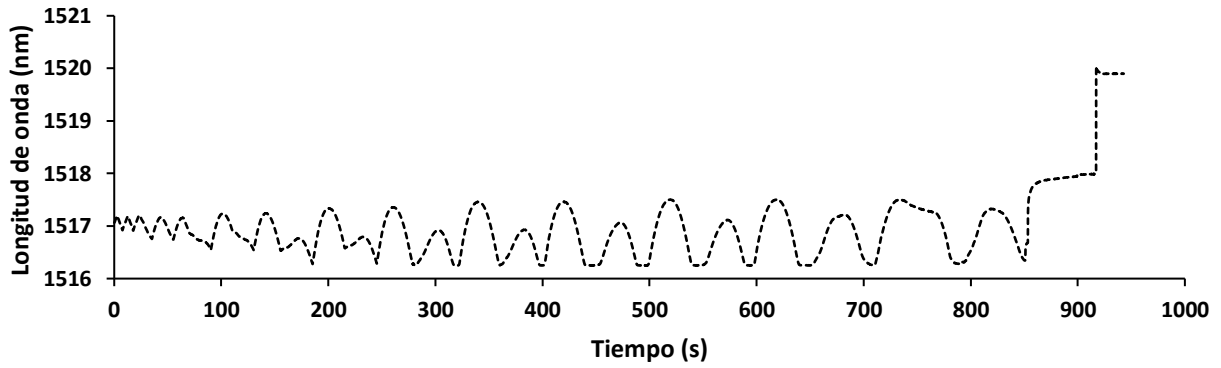


Gráfico 5.5.25 Datos capturados por el SFO (TS12-036)

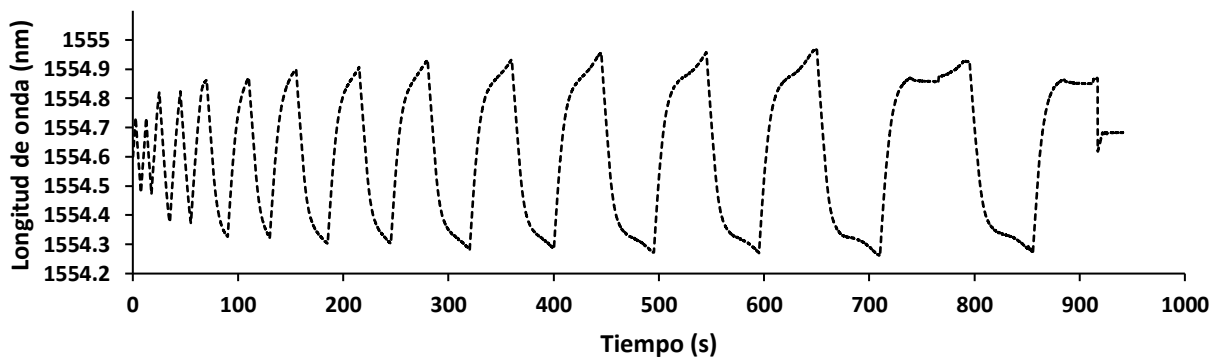


Gráfico 5.5.26 Datos capturados por el SFO (TS12-041)

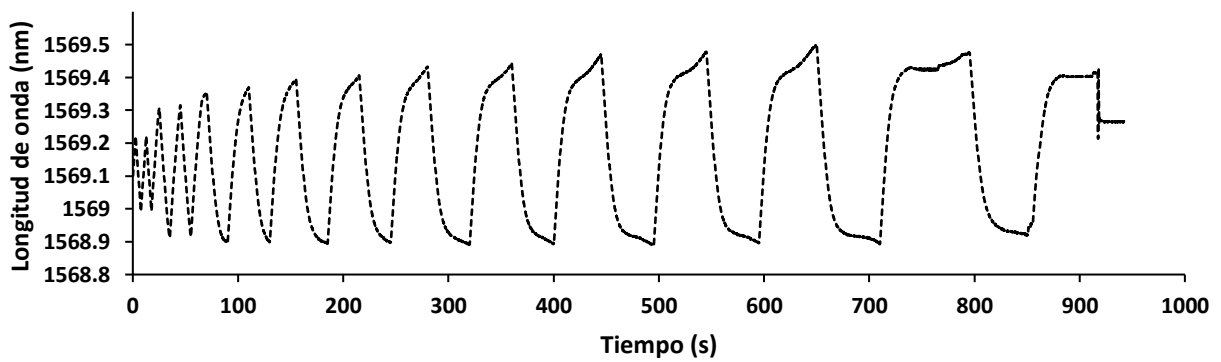


Gráfico 5.5.27 Datos capturados por el SFO (TS12-043)

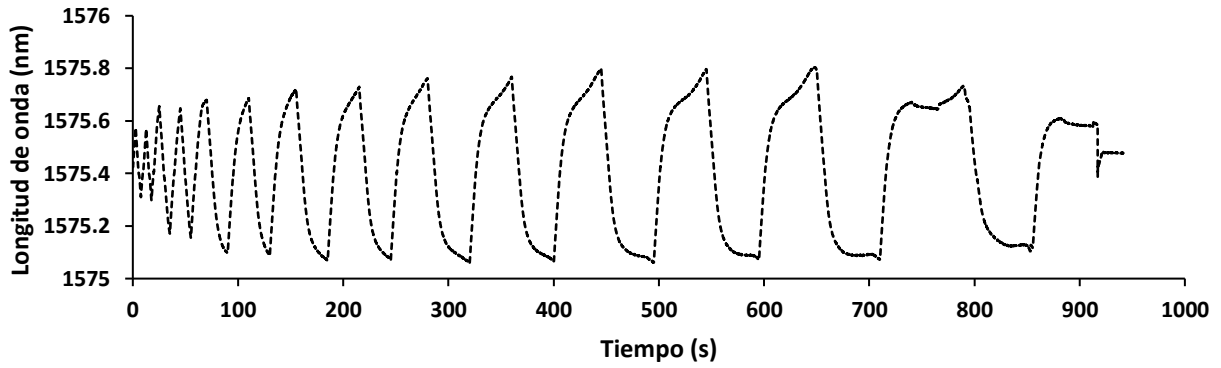


Gráfico 5.5.28 Datos capturados por el SFO (TS12-044)

Los datos capturados por los BDI se muestran a continuación:

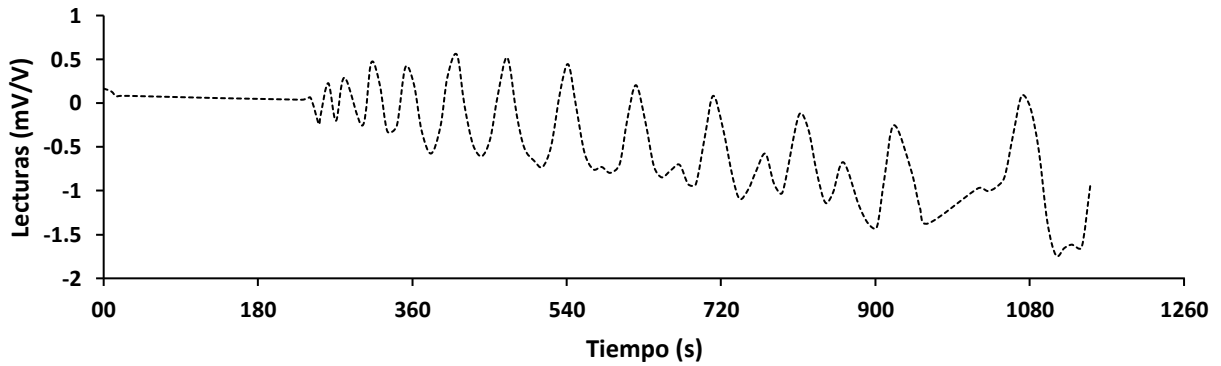


Gráfico 5.5.29 Datos capturados por el BDI (D4123)

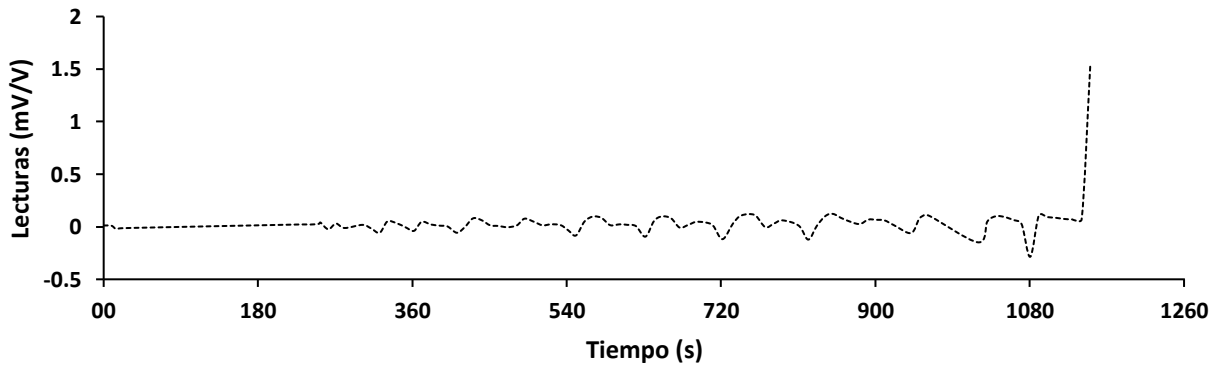


Gráfico 5.5.30 Datos capturados por el BDI (D4130)

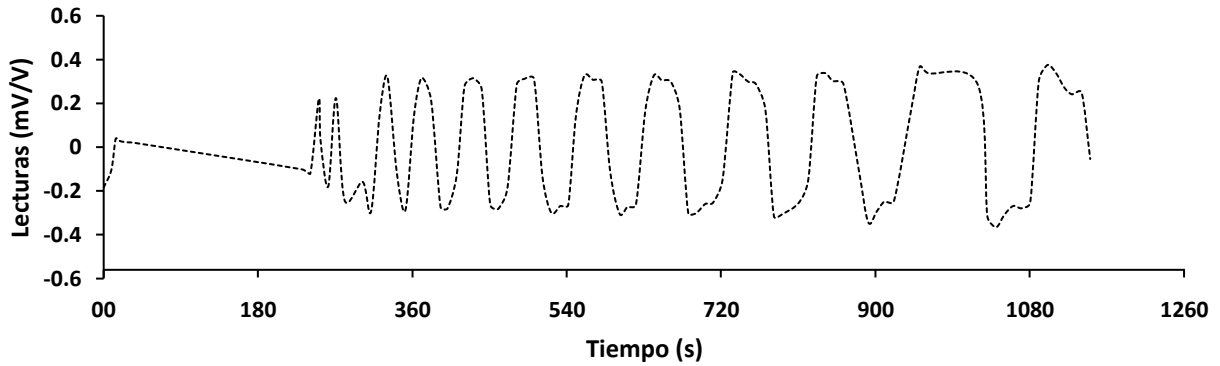


Gráfico 5.5.31 Datos capturados por el BDI (D4131)

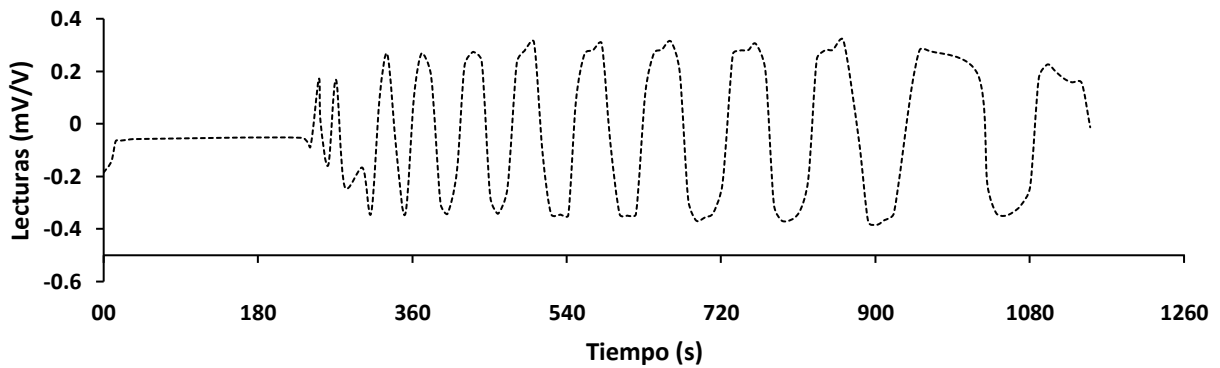


Gráfico 5.5.32 Datos capturados por el BDI (D4154)

El paso siguiente fue el procesamiento de la información para la obtención de las deformaciones sobre las superficies de estudio.

Se siguió el procedimiento análogo para la obtención de los valores de deformación como se ha especificado en el capítulo 5.2. Los factores de conversión pueden consultarse en la tabla 5.3 de la sección 5.2.

Comparación entre los valores reportados por los sensores de fibra óptica y deformímetros instalados en los disipadores

Vista Frontal

En la vista frontal, en el elemento encargado de transmitir la carga axial se instaló un SFO (TS12-044) y un BDI (D4154), ambos sensores no tuvieron falla en la adherencia entre el disipador y las bases de los sensores a lo largo de la prueba, por lo que se partió de la idea de que actuaron de manera similar al comportamiento del elemento. Los valores de deformaciones reportados se presentan a continuación en los gráficos 5.5.33 y 5.5.34:

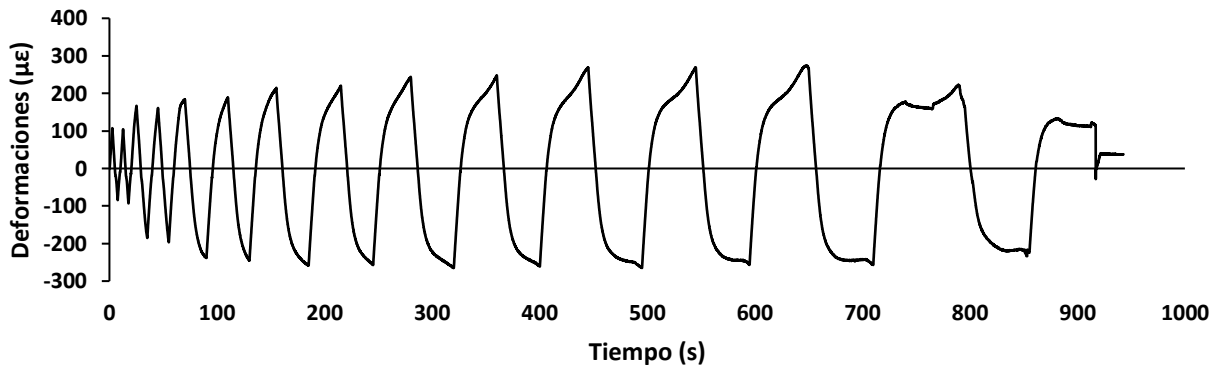


Gráfico 5.5.33 Deformación reportada por el SFO (TS12-044)

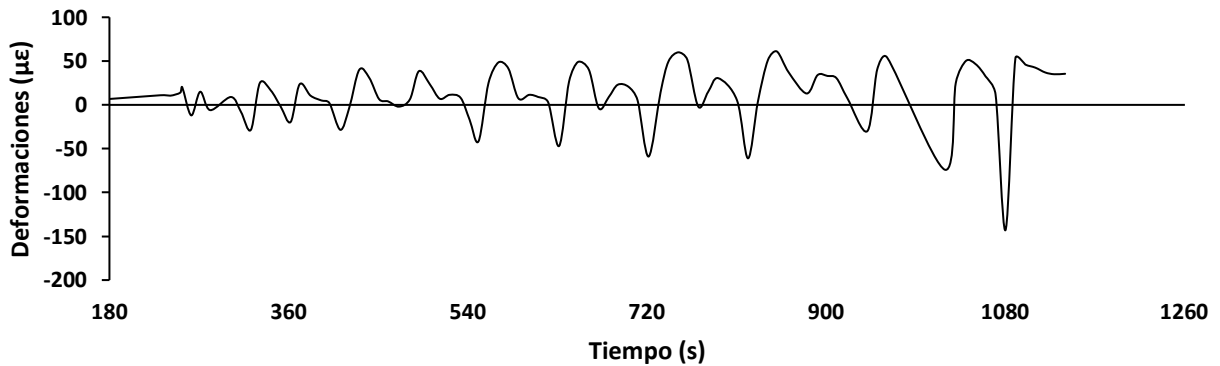


Gráfico 5.5.34 Deformación reportada por el BDI (D4154)

Vista Lateral Izquierda

En las caras ubicadas en la vista lateral izquierda se instaló un sensor de cada tipo con la diferencia de que el SFO (TS12-043) fue ubicado en el confinamiento azul y el BDI (D4130) en la placa lateral. Para este caso no podremos hacer una comparación directa entre ambos gráficos (gráfico 5.5.35 y gráfico 5.5.36) pero nos ayudaran a darnos una idea del desempeño de los sensores.

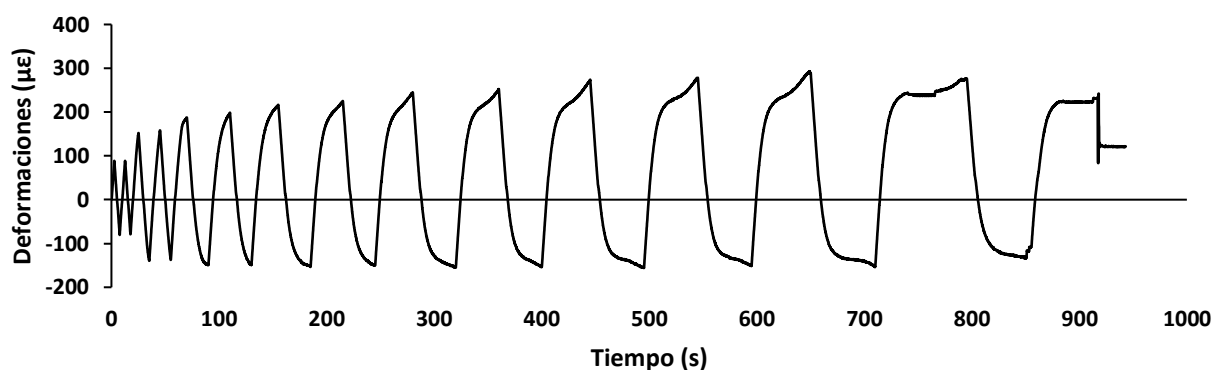


Gráfico 5.5.35 Deformación reportada por el SFO (TS12-043)

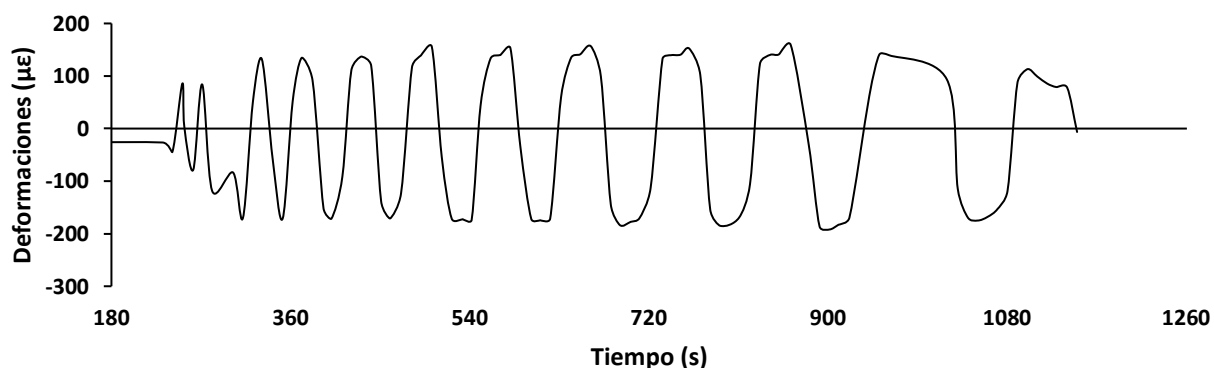


Gráfico 5.5.36 Deformación reportada por el BDI (D4130)

El comportamiento de estos sensores fue bueno en la mayor parte de la prueba pero cabe mencionar que durante el monitoreo se notó que el deformímetro BDI D4130 (ubicado en la placa de confinamiento) tuvo un fallo en la adherencia rumbo al final de la prueba, como podemos ver en el gráfico 5.5.36, para los últimos minutos de la prueba se capturaron valores mayores a los que se habían reportado a lo largo de la prueba, lo cual nos indica que esa información no corresponde al comportamiento real del elemento.

Vista Lateral Derecha

En la cara lateral derecha se tuvo la ventaja de poder instalar dos parejas de sensores (BDI y SFO) en dos elementos paralelos que conforman el dissipador. Esto se hizo con el objetivo de poder comparar el desempeño de ambos sensores. En el elemento que transmite la carga axial se instalaron los sensores TS12-041 y BDI D4131, mientras que en la placa de confinamiento de las placas de acero transversales se instalaron los sensores TS12-036 y BDI D4123.

Pareja de sensores instalados en la parte superior:

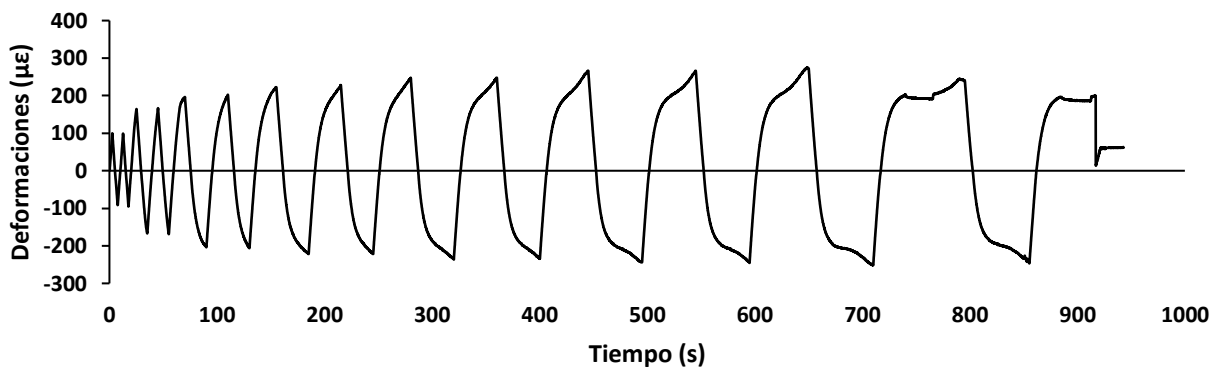


Gráfico 5.5.37 Deformación reportada por el SFO (TS12-041)

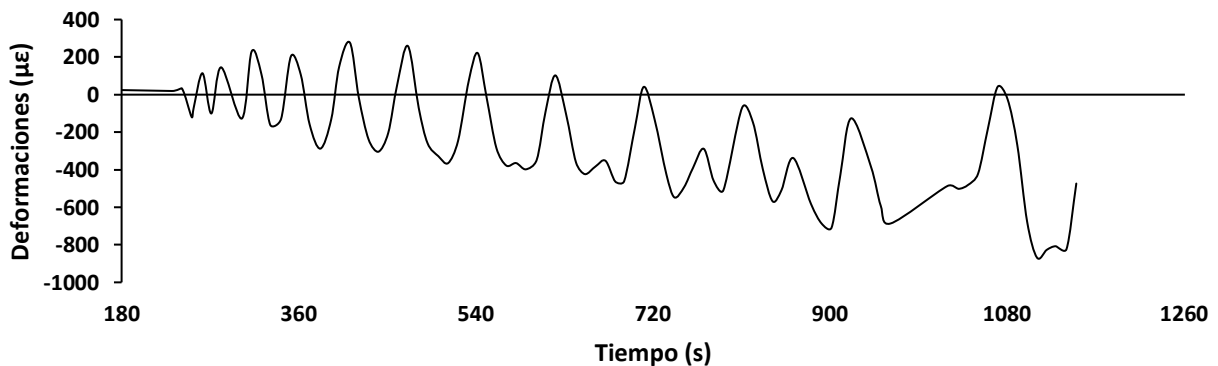


Gráfico 5.5.38 Deformación reportada por el BDI (D4131)

Pareja de sensores instalados en la parte inferior:

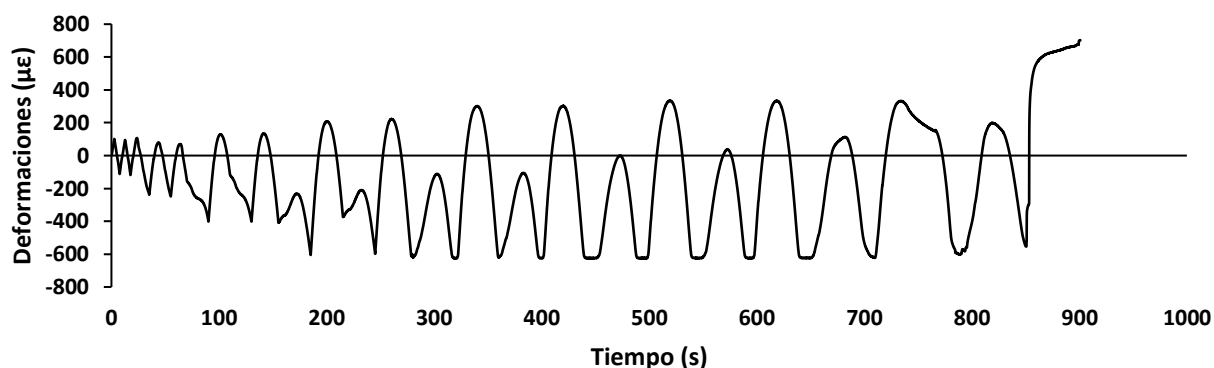


Gráfico 5.5.39 Deformación reportada por el SFO (TS12-036)

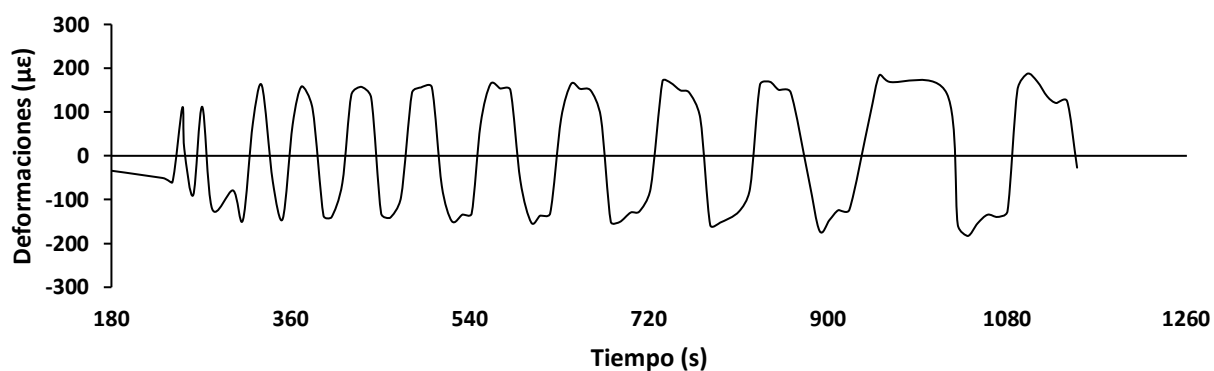


Gráfico 5.5.40 Deformación reportada por el BDI (D4123)

De los gráficos 5.5.39 y 5.5.40 rumbo al final de la prueba, los valores de deformación tuvieron un comportamiento diferente al de los otros sensores. Esto debido a que las deformaciones sobre la superficie instalada fueron tan grandes que el SFO se desprendió y el sensor BDI reportara valores de deformación cada vez mayores en sentido negativo.

Superposición de los valores reportados de deformación para sensores sobre la misma superficie

Ahora se presenta una comparación gráfica de las deformaciones obtenidas mediante los SFO y los DBI que se encontraban instalados de forma paralela.

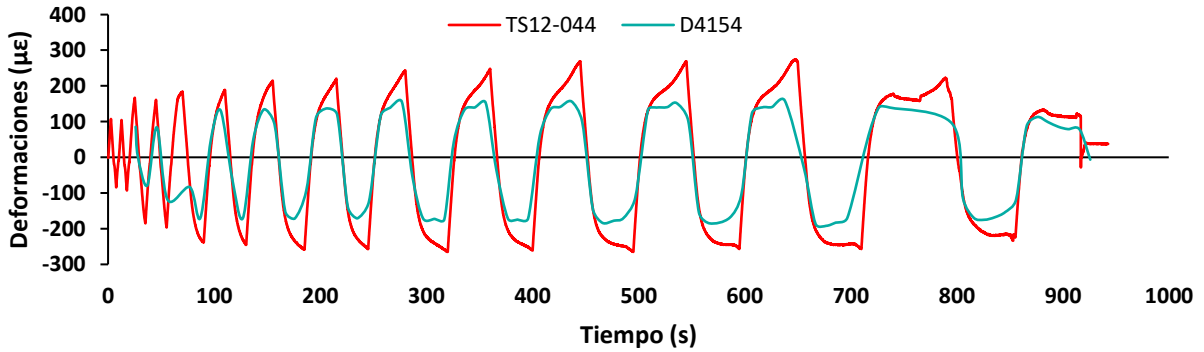


Gráfico 5.5.41 Comparación gráfica del BDI (D4154) y el SFO (TS12-044)

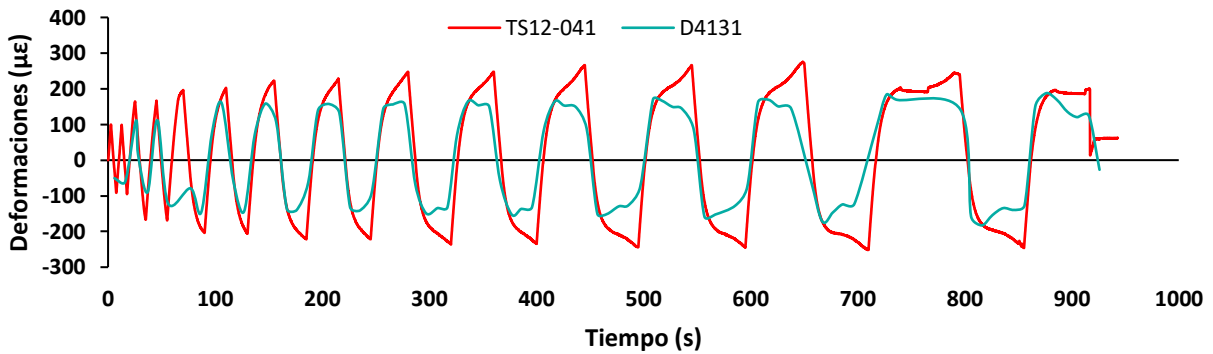


Gráfico 5.5.42 Comparación gráfica del BDI (D4131) y el SFO (TS12-041)

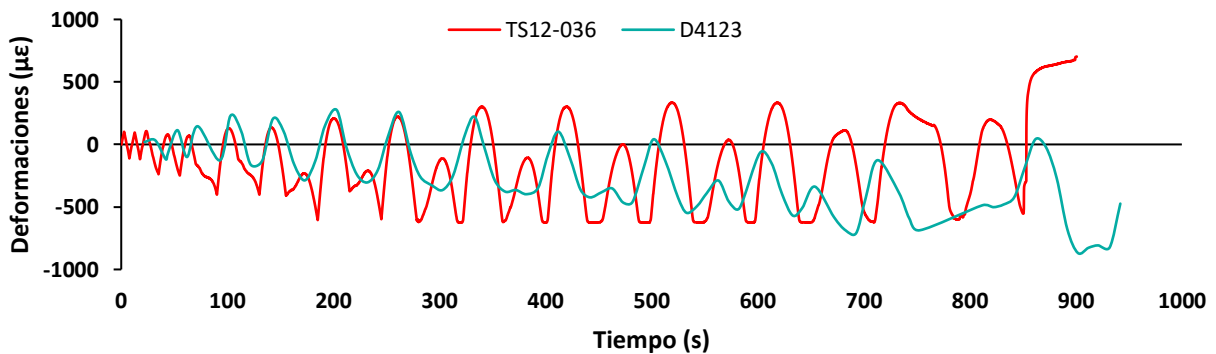


Gráfico 5.5.43 Comparación gráfica del BDI (D4123) y el SFO (TS12-036)

Finalmente cabe mencionar que en los gráficos 5.5.41 y 5.5.42 los sensores tuvieron un comportamiento similar, con la excepción de que los SFO

reportaron valores de deformación más altos pero más parecidos a la historia de carga (gráfico 5.5.23) aplicada sobre el disipador tipo 02.

Por otro lado se puede apreciar que para los sensores D4123 y TS12-036 los valores de deformación inicialmente presentaban un comportamiento similar pero finalmente los valores comenzaron a diverger en formas distintas, esto nos puede indicar que el comportamiento sobre la superficie instalada puede variar a pesar de la cercanía de los instrumentos de medición.

5.5.3 Disipador Tipo 03

5.5.3.1 Descripción del experimento disipador Tipo 03

El experimento consistió en la aplicación de carga axial de manera vertical sobre el disipador de energía tipo 03 (figura 5.5.19), con el objetivo de obtener información acerca de su comportamiento y del desempeño de los sensores instalados.

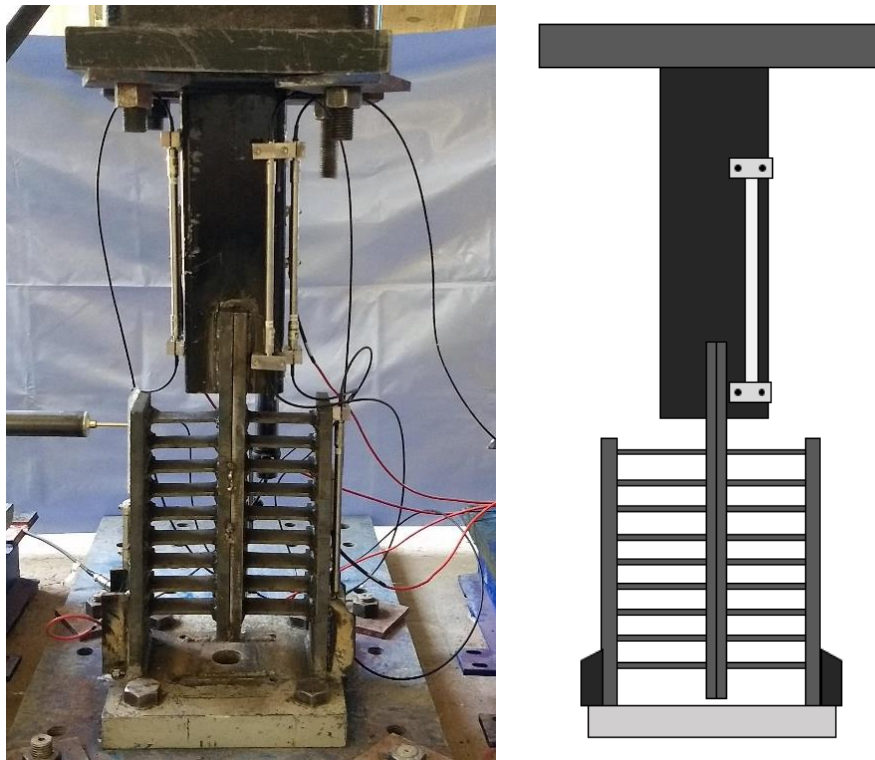


Figura 5.5.19 Disipador de energía sísmica tipo 03

Para entender la prueba de mejor manera a continuación, se presenta la historia de carga del actuador (gráfico 5.5.44) y su desplazamiento (gráfico 5.5.45) a través del tiempo.

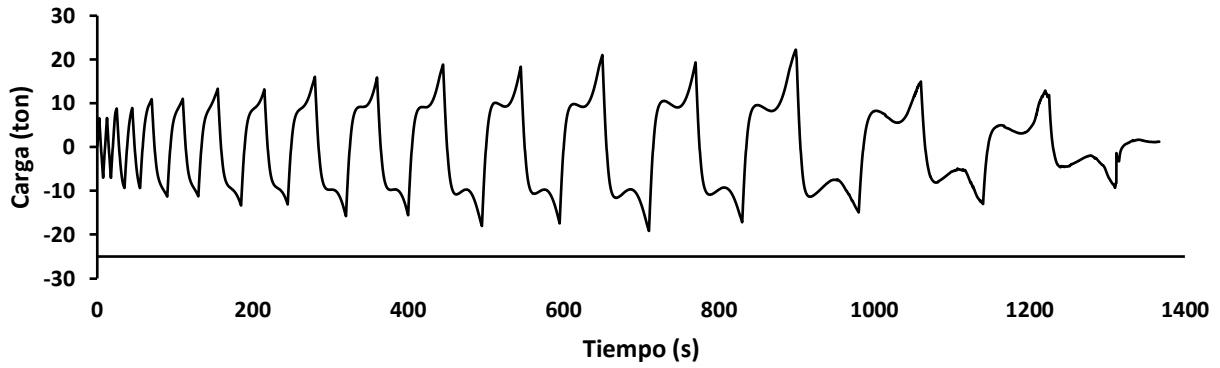


Gráfico 5.5.44 Historia de carga del actuador

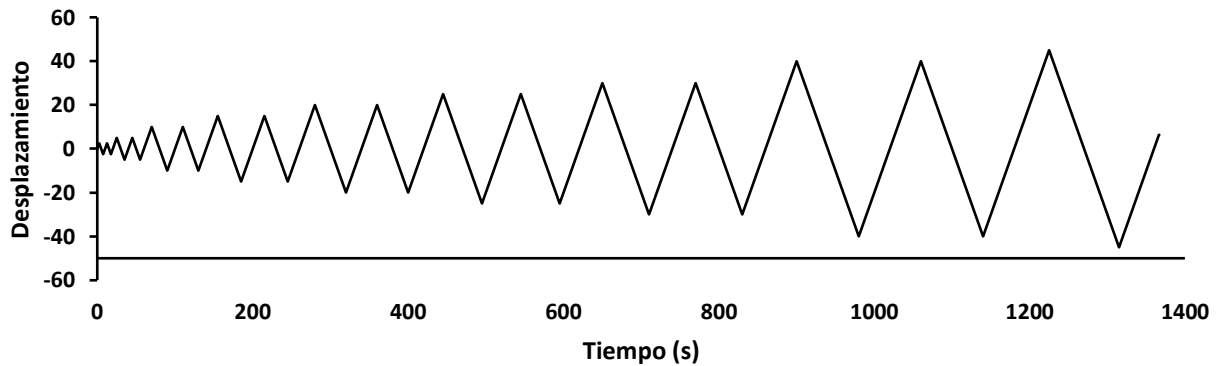


Gráfico 5.5.45 Desplazamiento del actuador

El actuador aplicó diferentes ciclos de carga, en los cuales se pudo apreciar la deformación de las placas laterales y las placas transversales hasta el momento en el que se presentó la falla. El comportamiento general de la prueba puede apreciarse en la figura 5.5.20, pues puede observarse el desplazamiento vertical de uno de los extremos de las placas laterales.

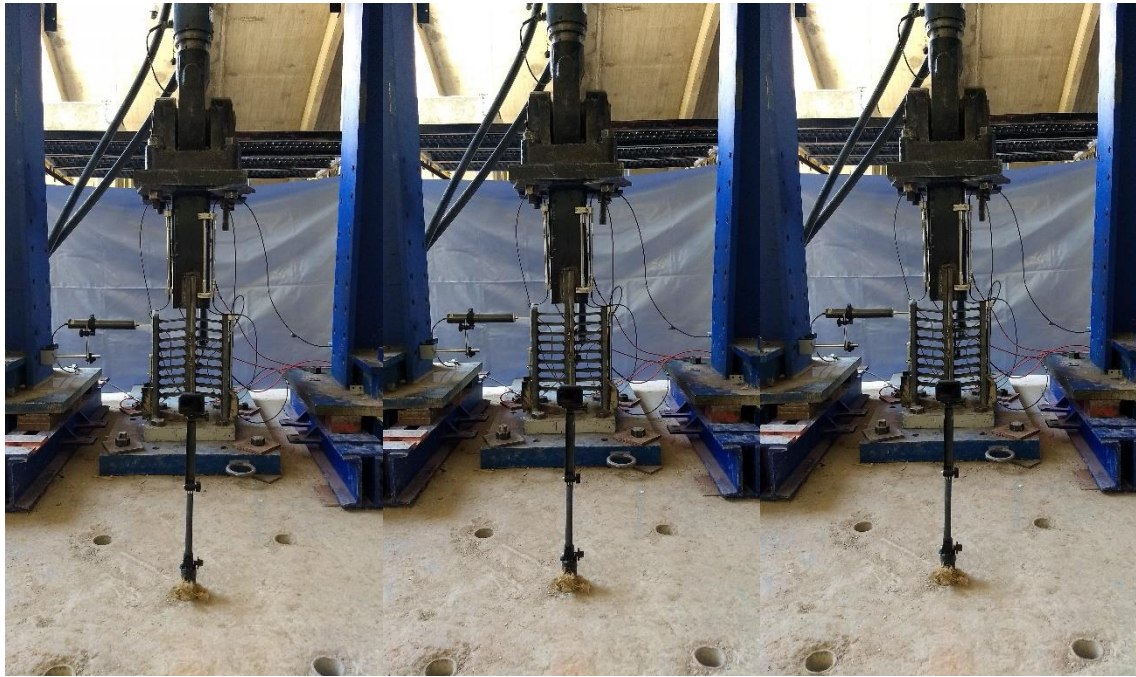


Figura 5.5.20 Comportamiento del disipador de energía durante la prueba

5.5.3.2 Instrumentación del disipador Tipo 03

En esta prueba se hizo uso de cuatro sensores de fibra óptica (TS12-036, TS12-041, TS12-043 y TS12-044) y de cuatro sensores BDI (D4131, D4130, D4123 y D154) cuya distribución en el experimento se muestra a continuación:

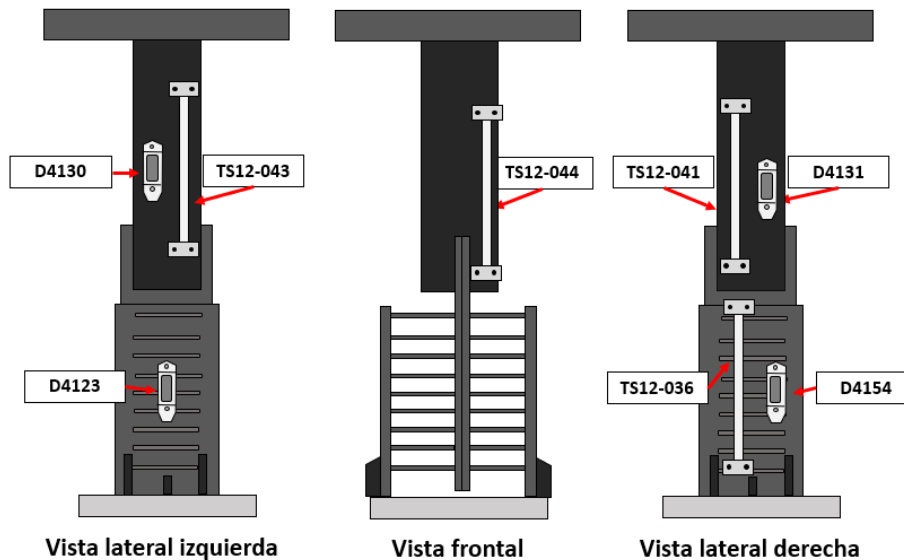


Figura 5.5.21 Esquema del disipador y localización de los dos tipos de sensores instalados

Al igual que en las pruebas anteriores, los SFO y los BDI fueron instalados de tal manera que no se interfiriera con la instrumentación original del experimento, pero que se tuviera la capacidad de hacer comparaciones entre sensores (figuras 5.5.21 y 5.5.22). Para que esto fuera posible, en algunos casos se instaló junto a un SFO un BDI y en otros casos se buscó simetría en la instrumentación como se observa con los sensores D4130 y TS12-043 (vista lateral izquierda, figura 5.5.21) teniendo simetría con los sensores D4131 y TS12-041 (vista lateral derecha, figura 5.5.21).

La colocación de los instrumentos (figura 5.5.22 y 5.5.23) se realizó de acuerdo con los procedimientos indicados en la sección 5.1 de la presente tesis

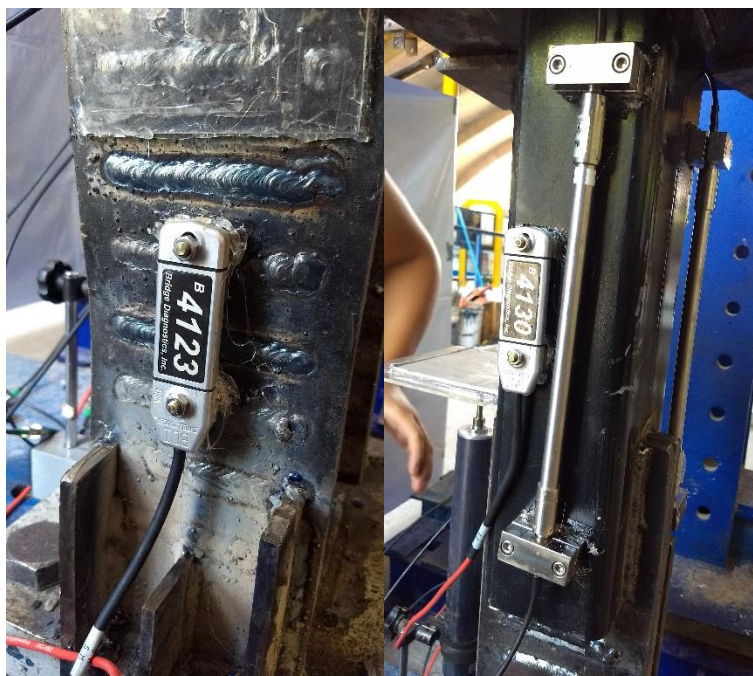


Figura 5.5.22 Instalación de los instrumentos de medición sobre el dissipador de energía

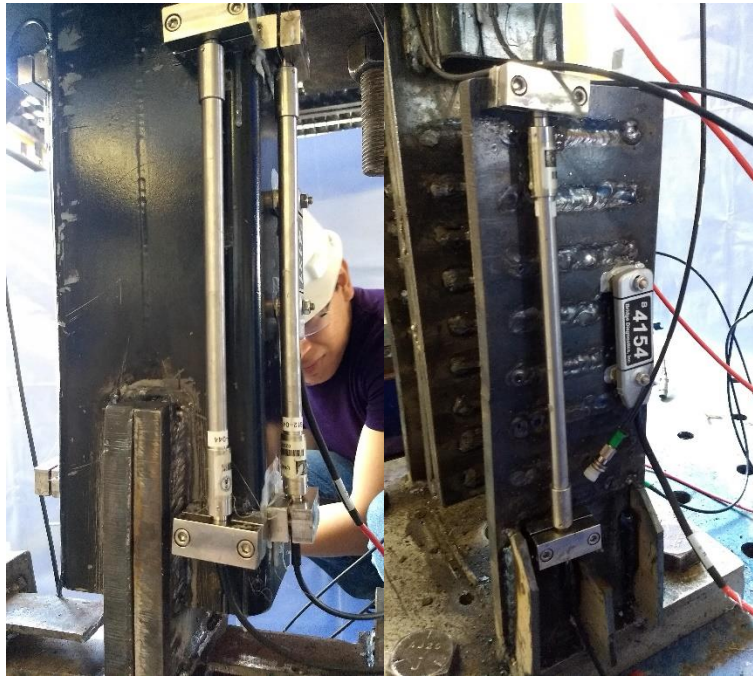


Figura 5.5.23 Instalación de los instrumentos de medición sobre el disipador de energía.

Como se observa en la figura 5.5.23 los sensores fueron colocados sobre una superficie muy irregular, esto debido a la soldadura de las placas transversales del disipador. Lo que significa un posible riesgo de desprendimiento durante la prueba de carga debido a una mala adherencia entre las bases de los sensores y la placa del disipador.

5.5.3.3 Análisis e interpretación de resultados del disipador Tipo 03

La prueba realizada tuvo una duración aproximada de 22 minutos. El intervalo de muestreo para los SFO se estableció a cada 0.10 s y para los BDI a cada 10 s.

Se dio por terminada la prueba cuando se llegó a la falla de la mayoría de las placas transversales como se puede apreciar en la figura 5.5.24, para los sensores instalados llegó un punto en el que el BDI-B4123 no participo más en la prueba debido a que la superficie sobre la que se encontraba adherido sufrió una deflexión considerable (placa lateral izquierda, figura 5.5.24) que culminó en el desprendimiento del sensor.

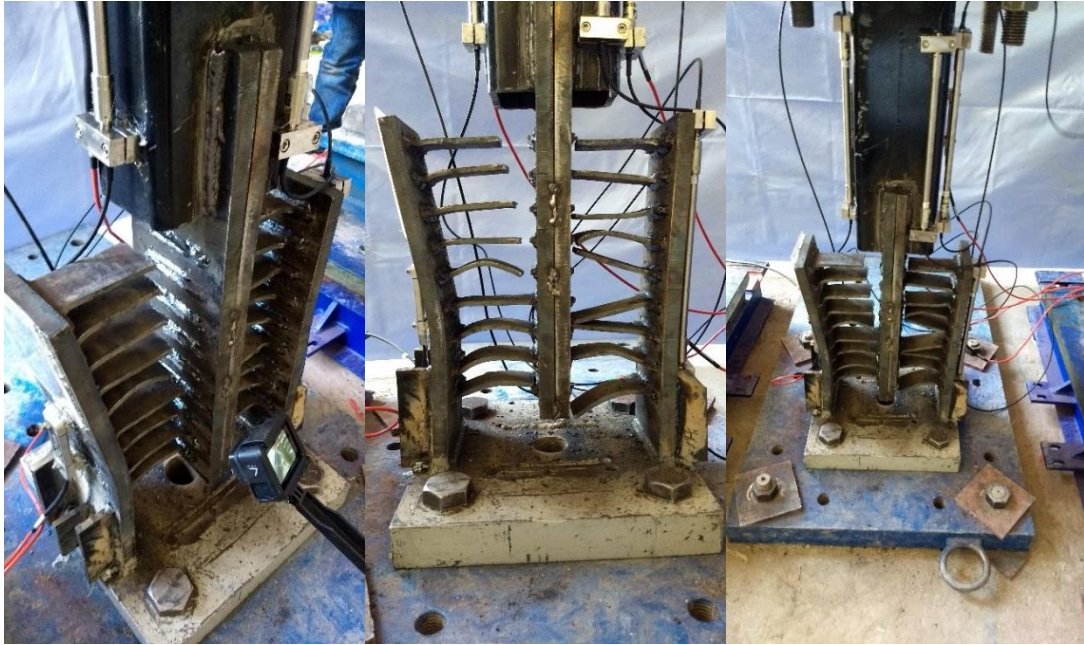


Figura 5.5.24 Estado del disipador al final de la prueba.

Información capturada por los sensores de fibra óptica y sensores BDI

Los datos capturados por los sensores de fibra óptica se muestran a continuación:

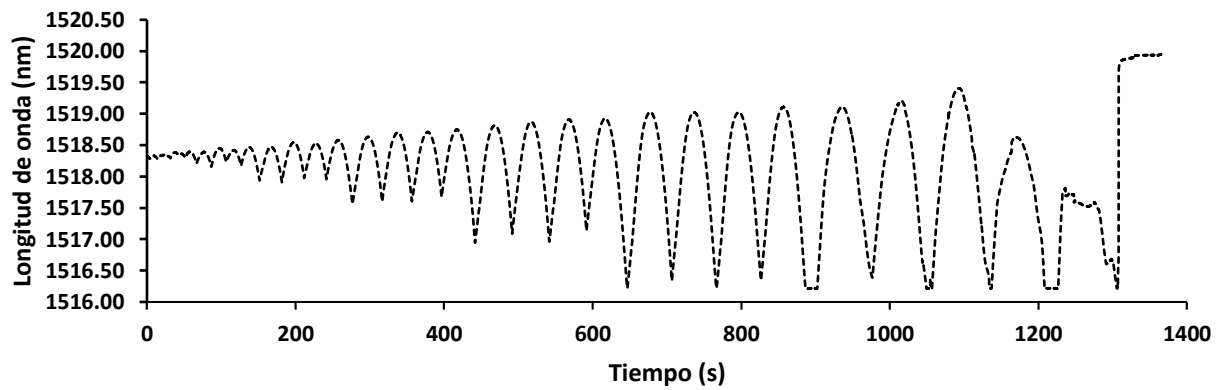


Gráfico 5.5.46 Datos capturados por el SFO (TS12-036)

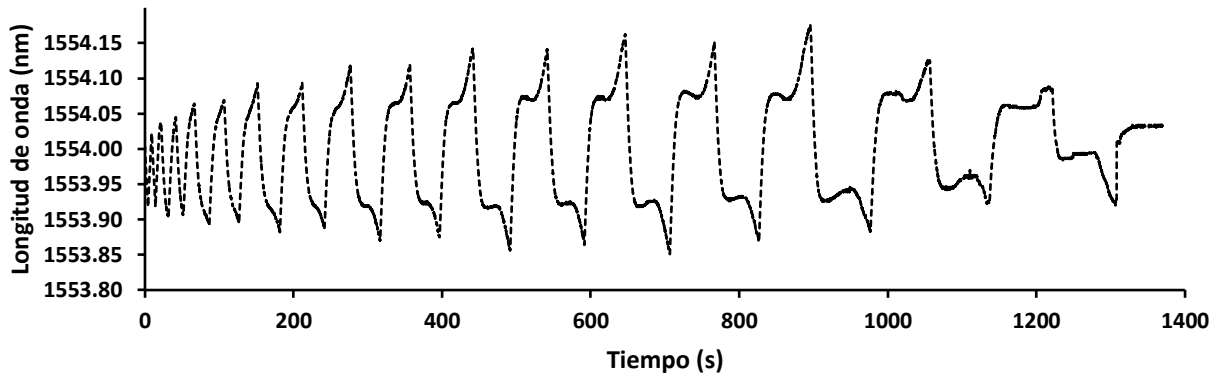


Gráfico 5.5.47 Datos capturados por el SFO (TS12-041)

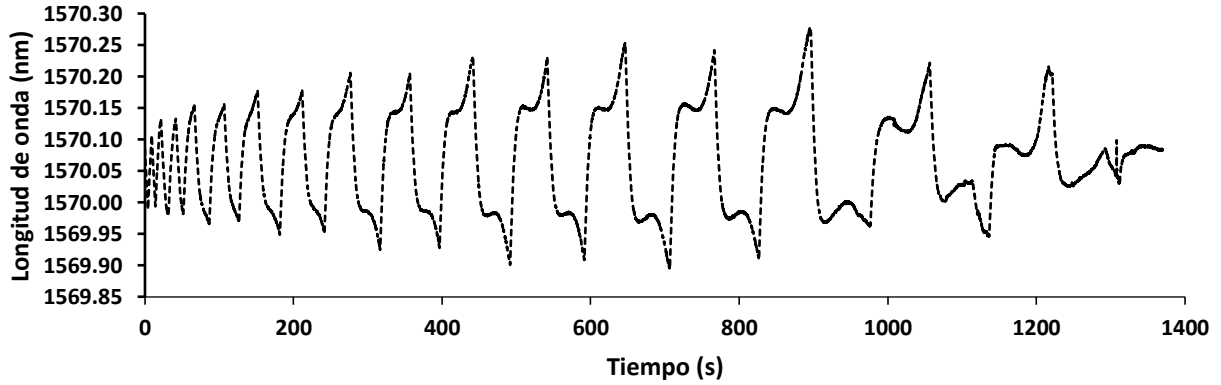


Gráfico 5.5.48 Datos capturados por el SFO (TS12-043)

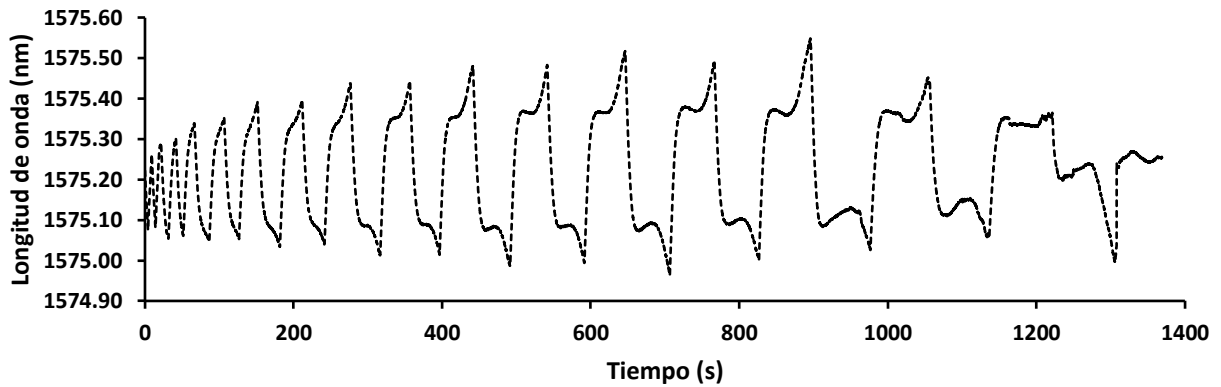


Gráfico 5.5.49 Datos capturados por el SFO (TS12-044)

Los datos capturados por los BDI se muestran a continuación:

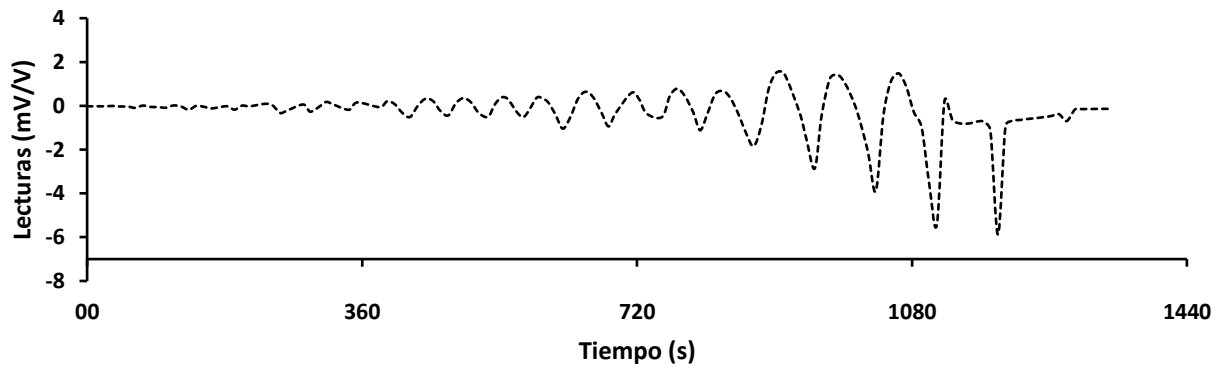


Gráfico 5.5.50 Datos capturados por el BDI (D4130)

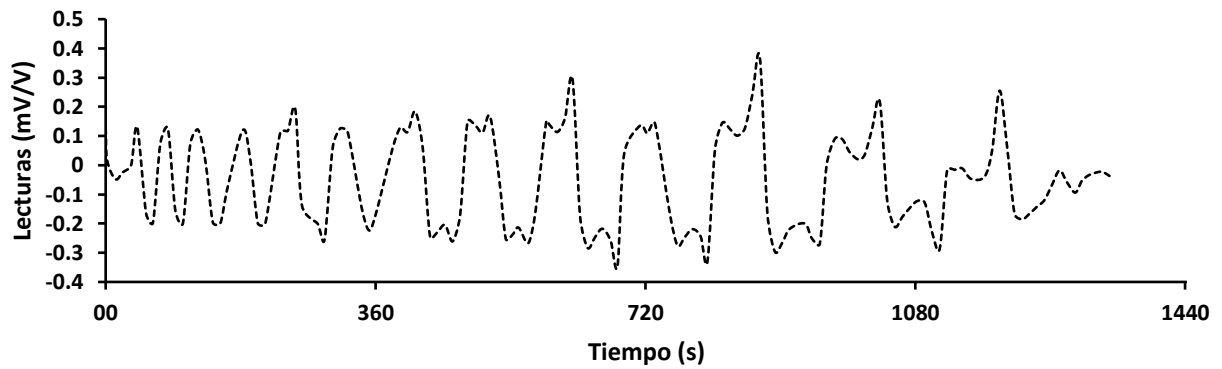


Gráfico 5.5.51 Datos capturados por el BDI (D4123)

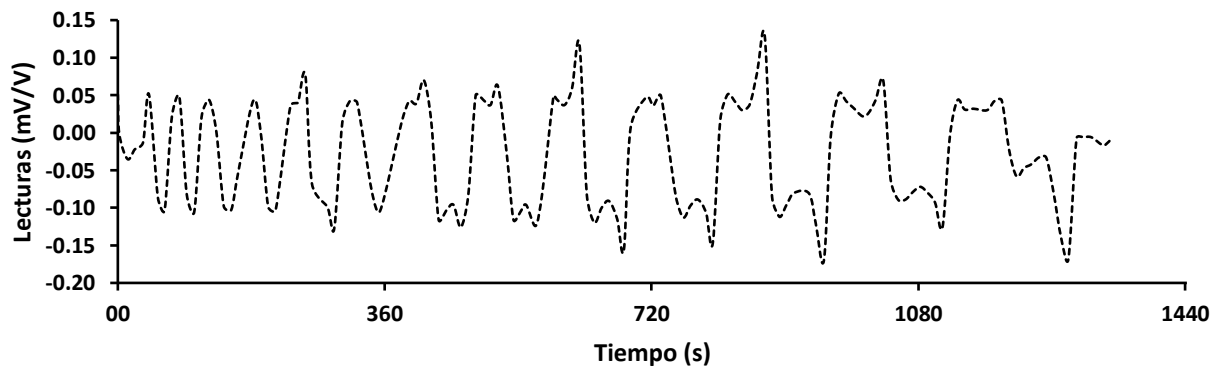


Gráfico 5.5.52 Datos capturados por el BDI (D4131)

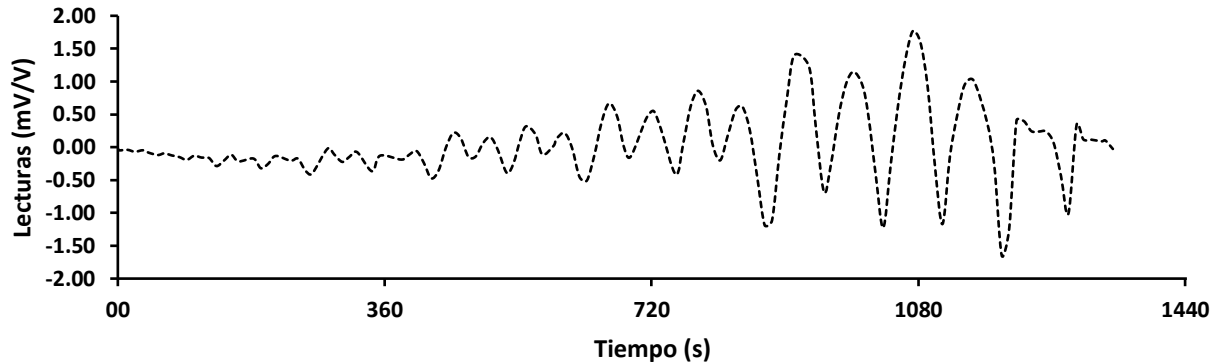


Gráfico0 5.5.53 Datos capturados por el BDI (D4154)

El siguiente paso fue el procesamiento de la información para la obtención de las deformaciones sobre las superficies de estudio.

Se siguió el procedimiento análogo para la obtención de los valores de deformación como se ha especificado en el capítulo 5.2. Los factores de galga pueden consultarse en la tabla 5.3 del capítulo 5.2.

Comparación entre los valores reportados por los sensores de fibra óptica y deformímetros instalados en los disipadores

Vista Frontal

En la vista frontal, en el elemento encargado de transmitir la carga axial únicamente se instaló un SFO (TS12-044), el sensor no presentó ningún tipo de falla en la adherencia, por lo que se partió de la idea de que la información obtenida es representativa del elemento. Los valores de deformación reportados se presentan a continuación (gráfico 5.5.54).

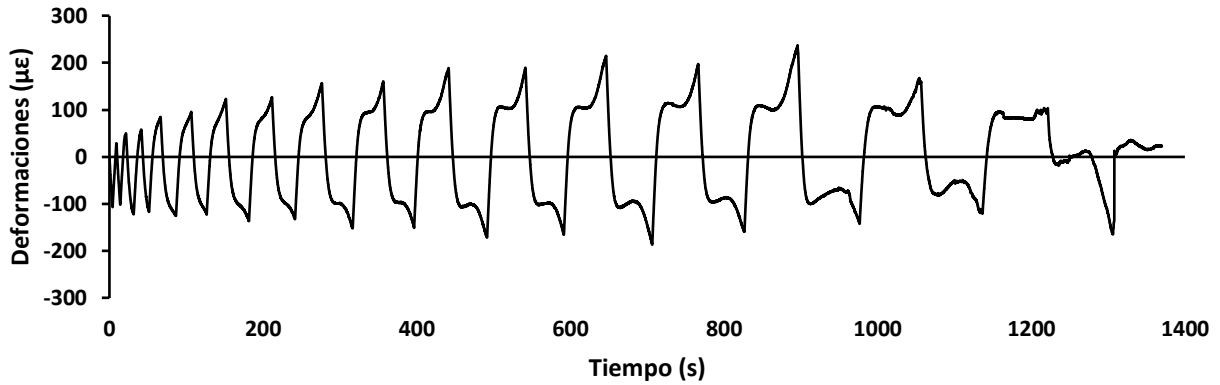


Gráfico 5.5.54 Deformación reportada por el SFO (TS12-044)

Vista Lateral Izquierda

En las caras ubicadas en la vista lateral izquierda se instalaron tres instrumentos de medición, dos BDI (D4130 y D4123) y un SFO (TS12-043), cabe mencionar que los sensores D4130 y TS12-043 tomaron capturas sobre la misma superficie (gráficos 5.5.55 y 5.5.56).

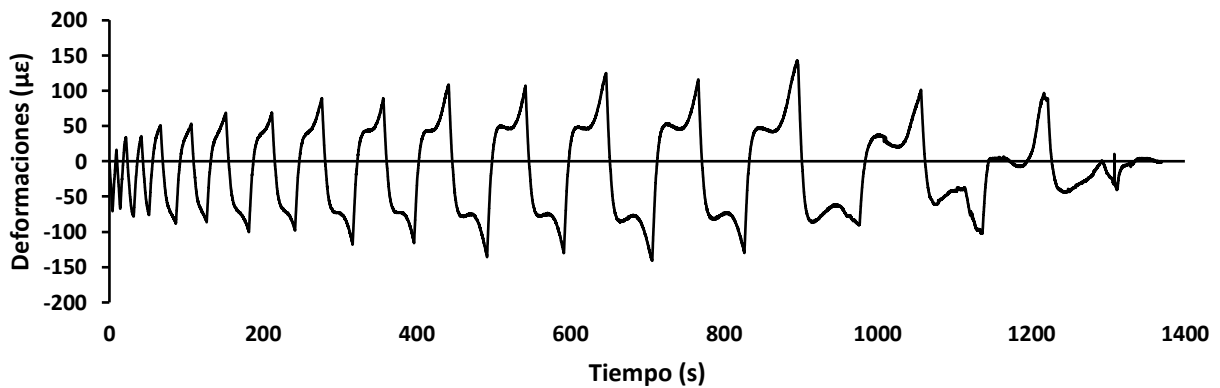


Gráfico 5.5.55 Deformación reportada por el SFO (TS12-043)

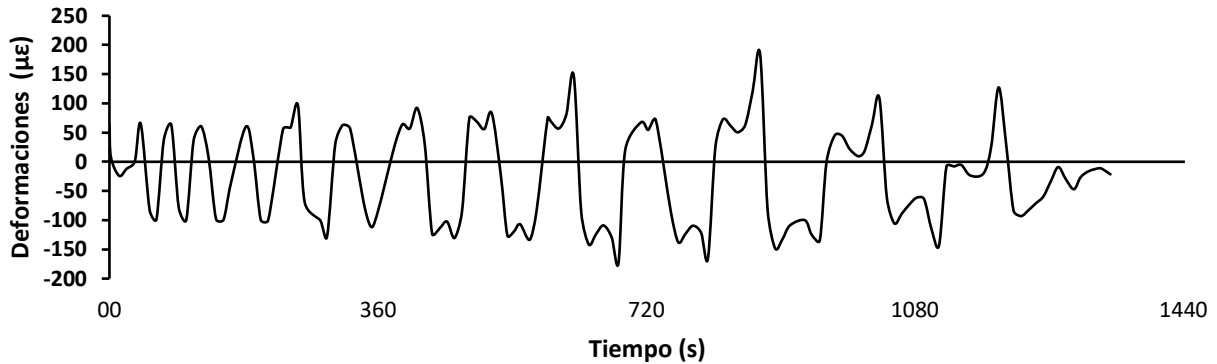


Gráfico 5.5.56 Deformación reportada por el deformímetro BDI (D4130)

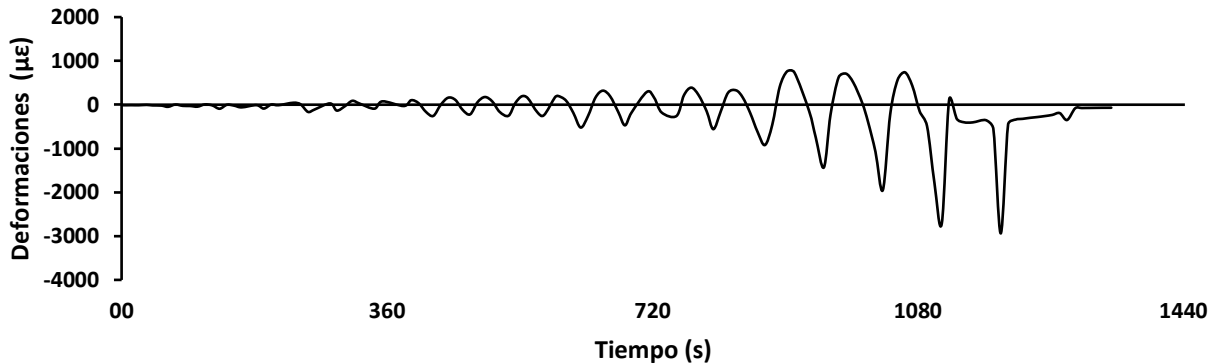


Gráfico 5.5.57 Deformación reportada por el deformímetro BDI (D4123)

Durante la prueba se detectó que el BDI D4123 se desprendió en una de sus bases debido a la flexión excesiva de la placa sobre la que estaba colocado, dicha flexión fue producida debido al desprendimiento paulatino de las placas transversales. Como se observa en la figura 5.5.24 y 5.5.25, al flexionarse la placa lateral, el sensor fue sometido a una gran compresión, registrando valores de deformación, como se observa en el gráfico 5.5.57, hasta de $-3000 \mu\epsilon$ (el signo negativo indica compresión), las deformaciones a tensión (provocadas por una flexión de la placa lateral hacia la derecha) fueron menores, con un valor máximo de $736 \mu\epsilon$, debido a que las placas transversales actuaron como restricción, trabajando a compresión incluso si la placa ya se había desprendido.

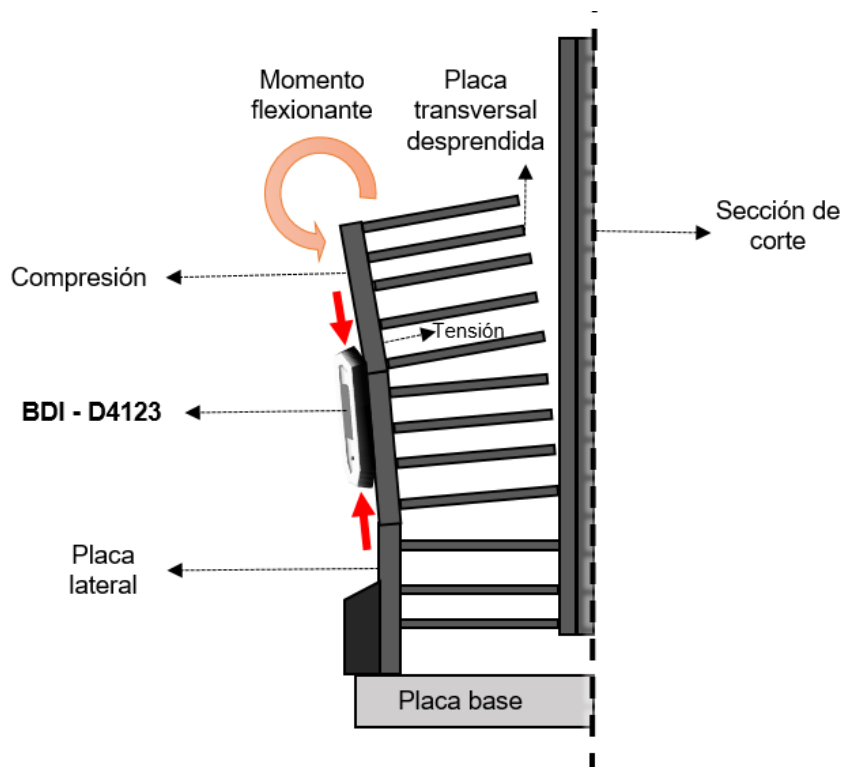


Figura 5.5.25 Fenómeno aislado de la flexión de una de las placas lateras y su influencia en el sensor BDI D4123

Vista Lateral Derecha

En las caras ubicadas en la vista lateral derecha se instalaron 4 instrumentos de medición, dos BDI (D4154 y D4131) y dos SFO (TS12-036 y TS12-041).

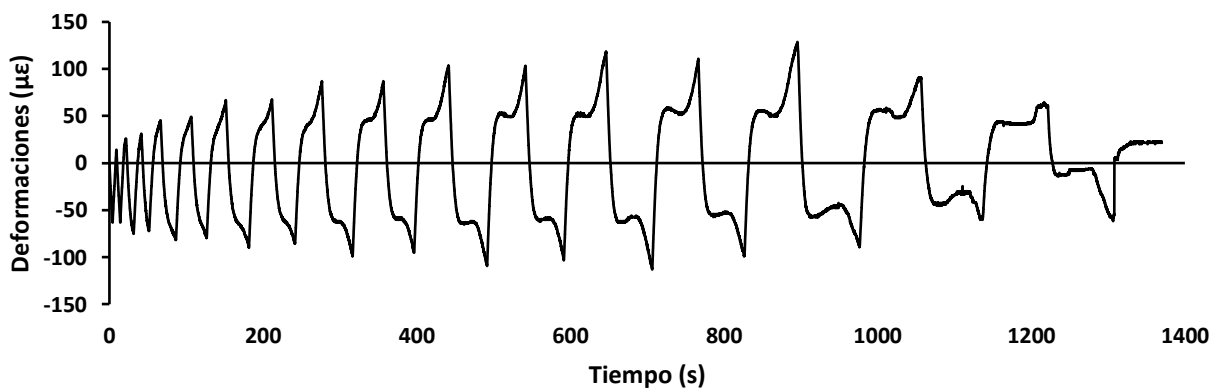


Gráfico 5.5.58 Deformación reportada por el SFO (TS12-041)

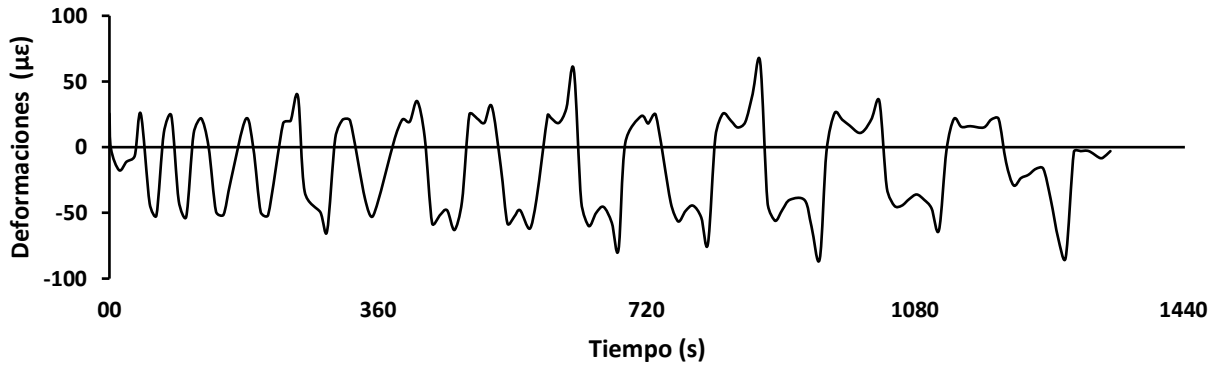


Gráfico 5.5.59 Deformación reportada por el deformímetro BDI (D4131)

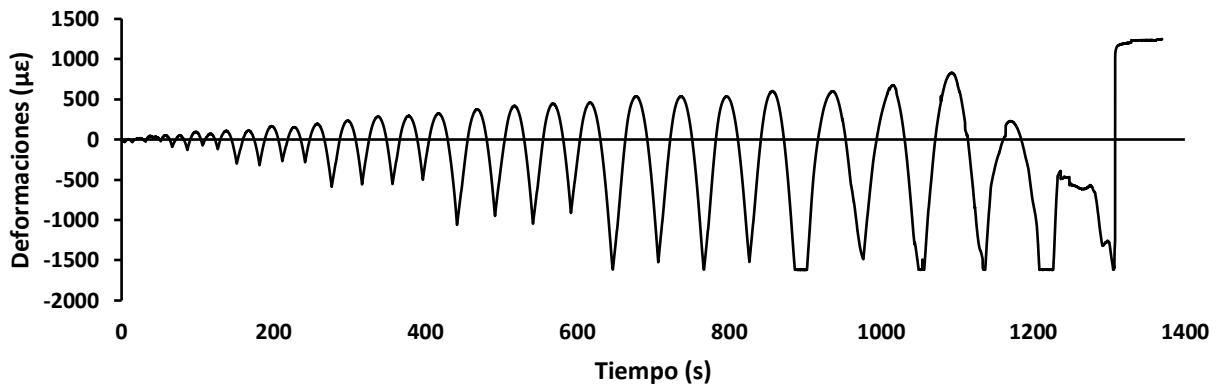


Gráfico 5.5.60 Deformación reportada por el SFO TS12-036

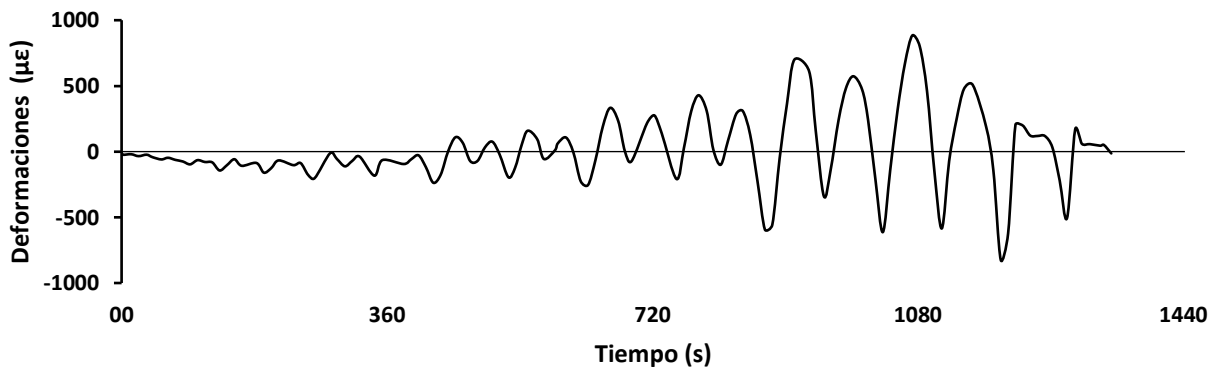


Gráfico 5.5.61 Deformación reportada por el BDI (D4154)

De los gráficos 5.5.60 y 5.5.61 se puede apreciar como el SFO TS12-036 empiezan valores altos de deformación, pero de un orden menor a las

deformaciones ocurridas en la cara lateral izquierda. En este caso los sensores se mantuvieron adheridos durante toda la prueba.

Superposición de los valores de deformación reportados por los sensores sobre la misma superficie

Ahora se presenta una comparación gráfica de las deformaciones obtenidas mediante los SFO y los BDI que se encontraban instalados de forma paralela.

De la superposición de resultados resultaron los gráficos 5.5.62, 5.5.63 y 5.5.64.

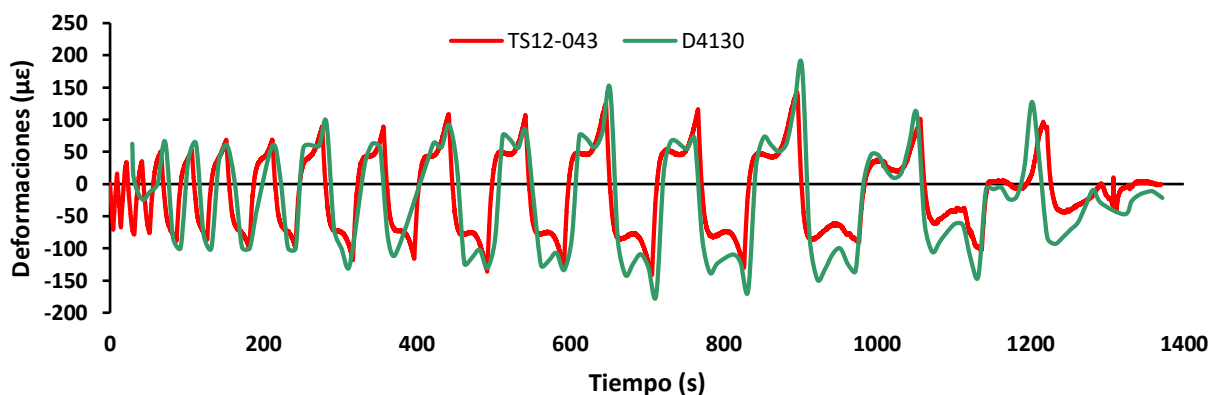


Gráfico 5.5.62 Comparación gráfica del BDI (D4130) y el SFO (TS12-043)

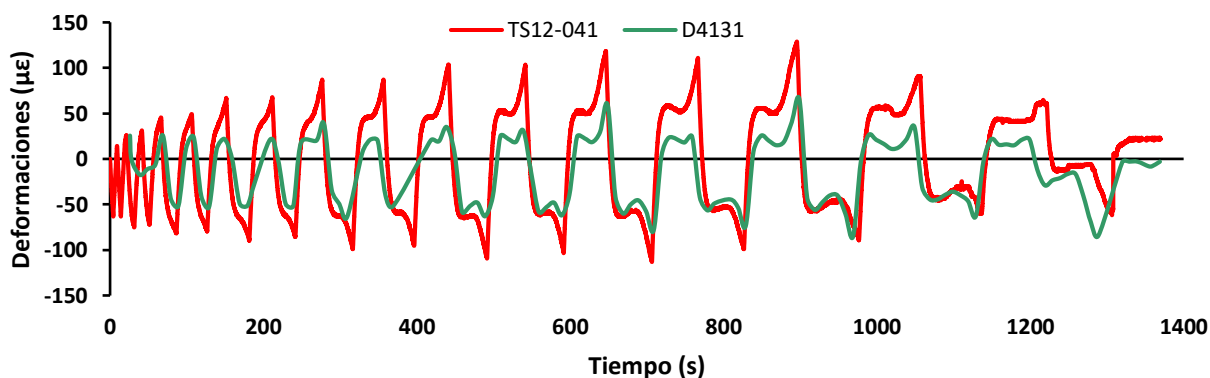


Gráfico 5.5.63 Comparación gráfica del BDI (D4131) y el SFO (TS12-041)

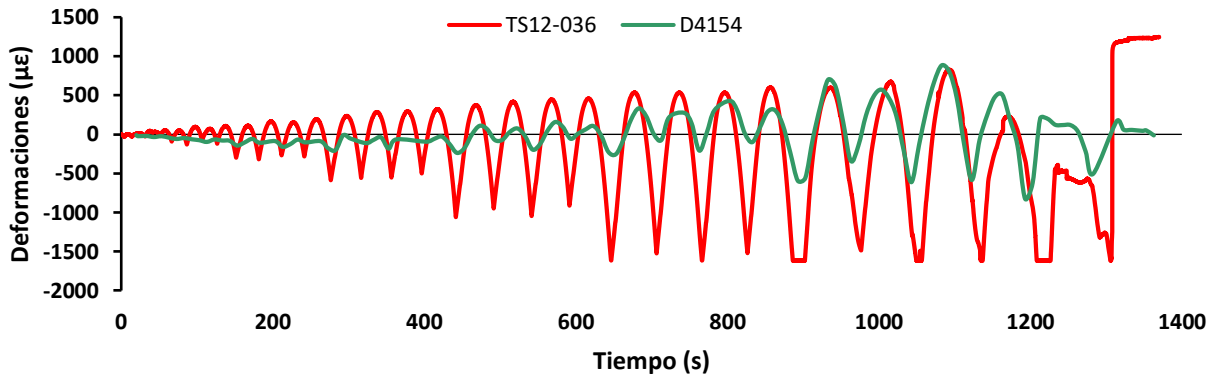


Gráfico 5.5.64 Comparación gráfica del BDI (D4154) y el SFO (TS12-036)

Finalmente, de los gráficos obtenidos para la comparación entre sensores se comenta lo siguiente:

Los gráficos 5.5.62 y 5.5.63 presentaron un comportamiento que corresponde a la historia de carga del actuador (figura 5.5.44) los sensores correspondientes a estos gráficos fueron los que se ubicaron en la superficie del perfil para la transmisión de cargas a las placas laterales. En el gráfico 5.5.62 se presentaron valores de deformación muy parecidos entre el SFO y el BDI, esto nos indica que bajo las condiciones adecuadas y si se ha hecho un proceso de instalación correcto, ambos sensores trabajaran de forma adecuada.

Adicionalmente del gráfico 5.5.64 se puede observar que los sensores siguieron el comportamiento de la placa de confinamiento exterior en la cara lateral derecha teniendo que el SFO presento valores mayores de deformación, esto puede ser debido a que abarca una longitud de medición mayor en comparación del BDI por lo que en este caso la combinación de estos dos sensores ayudará a comprender de mejor manera el comportamiento del elemento estructural.

5.5.4 Disipador Tipo 04

5.5.4.1 Descripción del experimento disipador Tipo 04

El experimento en cuestión se llevó a cabo en 3 etapas, donde es importante mencionar que el sensor de fibra óptica trabajo de forma adecuada hasta antes de comenzar la tercera etapa, debido a que las condiciones se iban presentando no eran las más adecuadas para la integridad del sensor de fibra óptica.

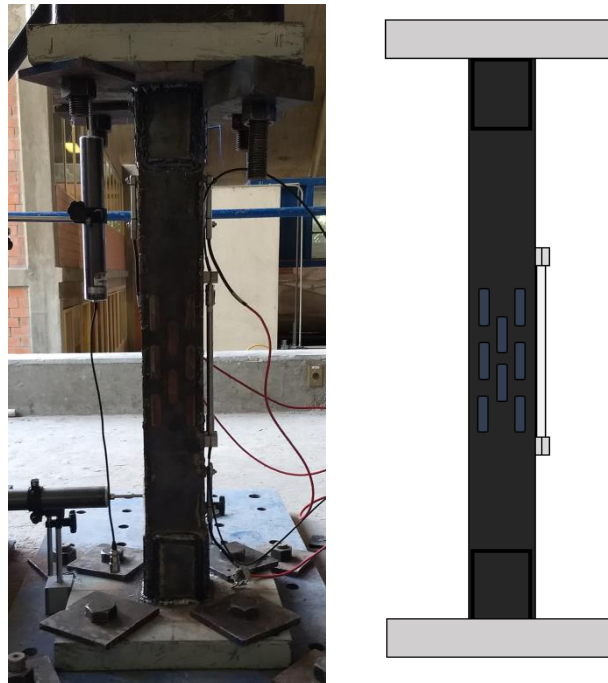


Figura 5.5.26 Disipador de energía sísmica tipo 04

El experimento consistió en la aplicación de carga axial sobre un disipador de energía sísmica (figura 5.5.26) con el objetivo de obtener información acerca de su comportamiento y del desempeño de los sensores instalados.

Para entender la prueba de mejor manera, a continuación, se presenta la historia de carga del actuador para las 3 etapas (gráficos 5.5.65, 5.5.67 y 5.5.69) y su respectivo desplazamiento (gráficos 5.5.66, 5.5.68 y 5.5.70) a través del tiempo.

Etapa 01

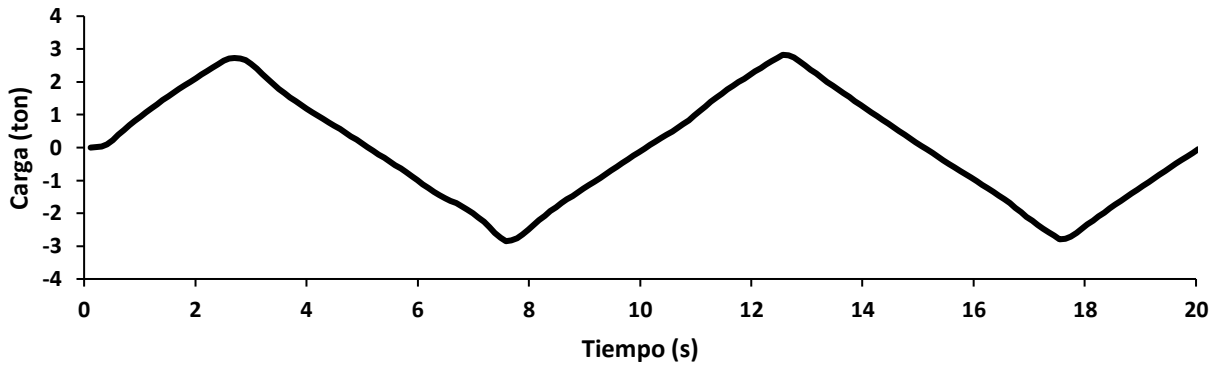


Gráfico 5.5.65 Historia de carga del actuador

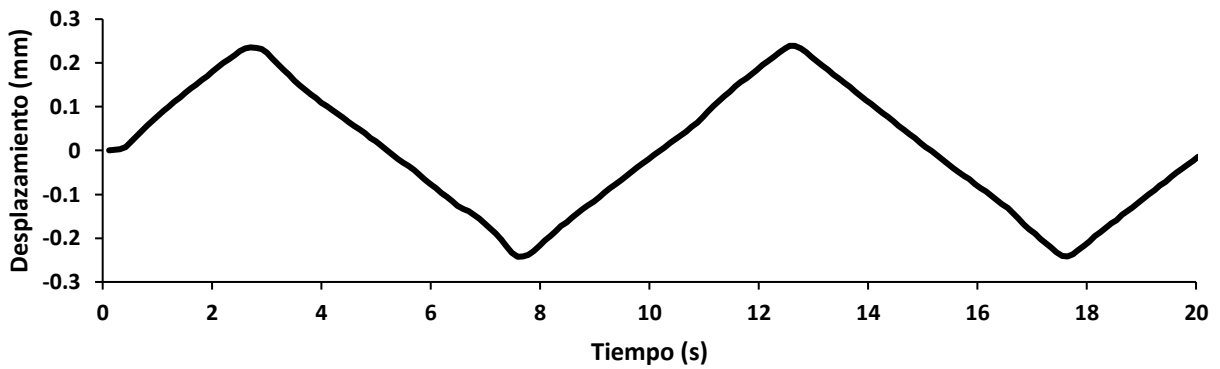


Gráfico 5.5.66 Desplazamiento del actuador

Etapa 02

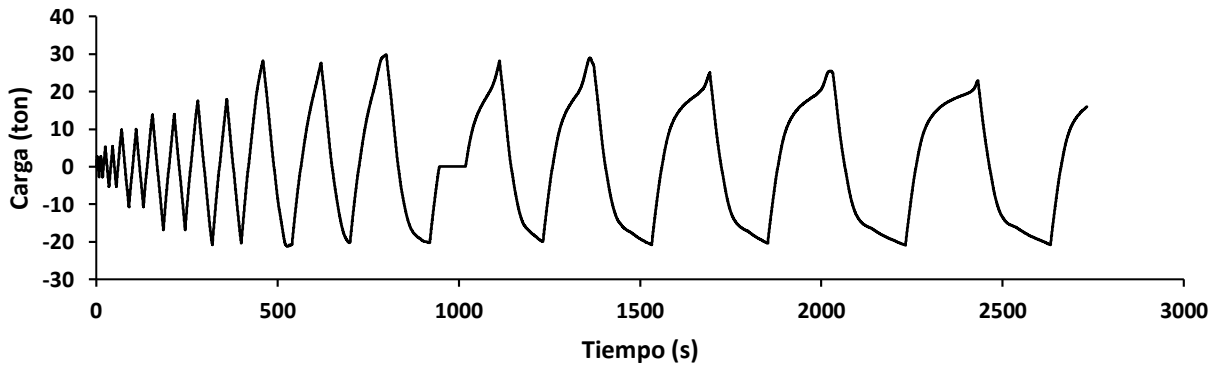


Gráfico 5.5.67 Historia de carga del actuador

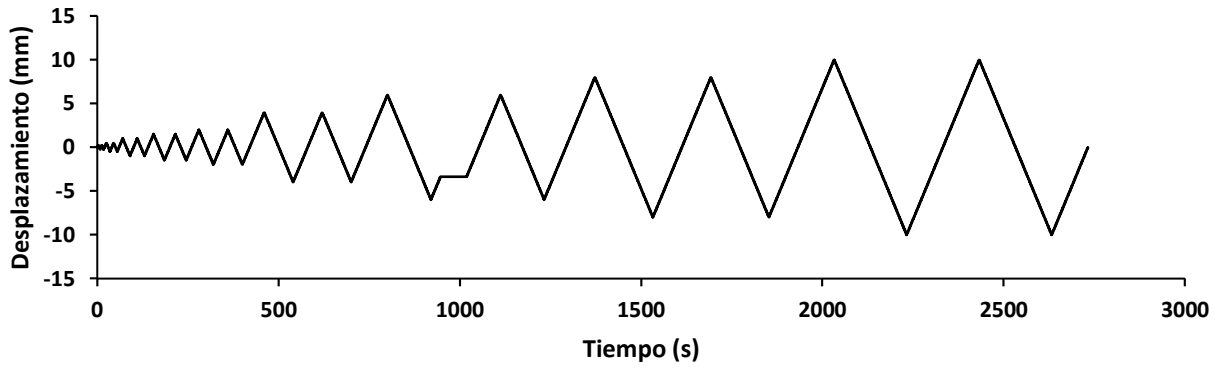


Gráfico 5.5.68 Desplazamiento del actuador

Etapa 03

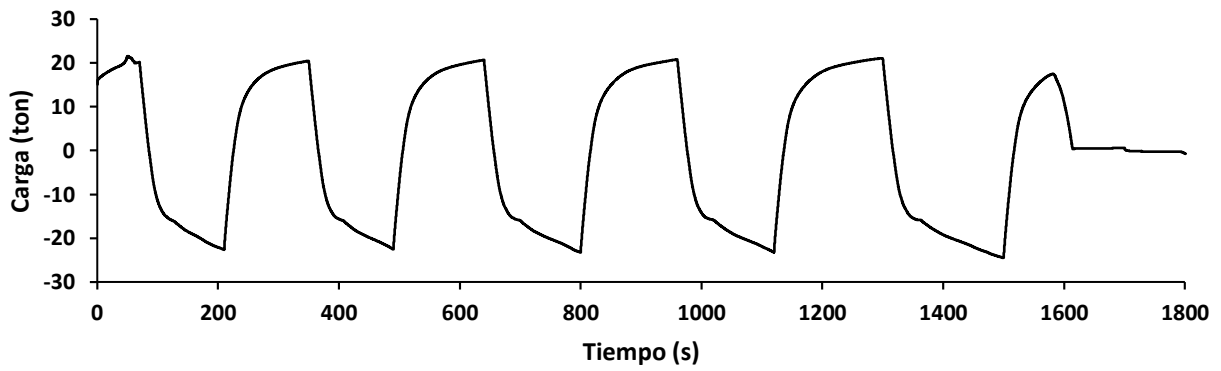


Gráfico 5.5.69 Historia de carga del actuador

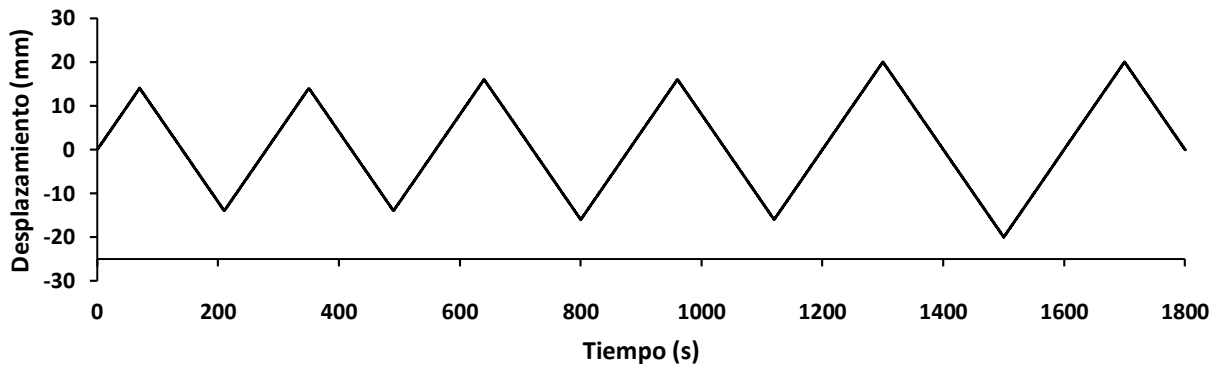


Gráfico 5.5.70 Desplazamiento del actuador

El actuador aplicó diferentes ciclos de carga, en los cuales se pudo apreciar la deformación de las placas. El comportamiento general de la prueba puede apreciarse en la figura 5.5.27.



Figura 5.5.27 Comportamiento del disipador de energía durante la prueba

5.5.4.2 Instrumentación del disipador Tipo 04

Este disipador solo fue instrumentado con un SFO (TS12-040) y con cuatro BDI (D4131, D4130, D4123 y D154) tal como se ve la figura 5.5.28 y la figura 5.5.29.

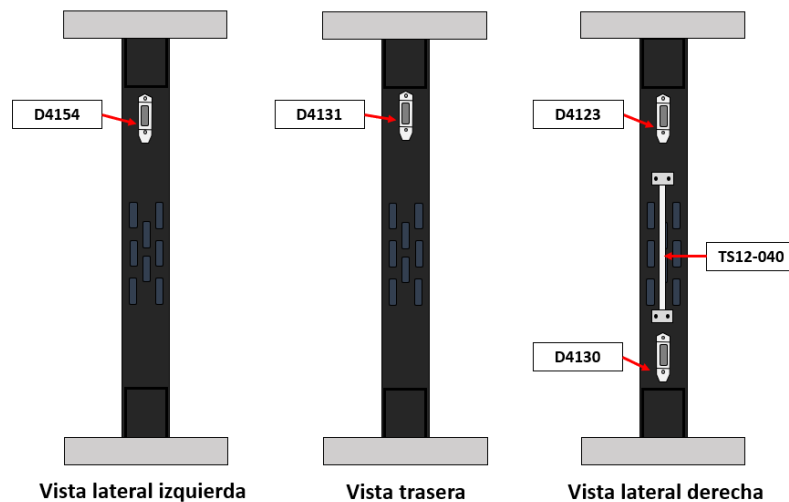


Figura 5.5.28 Esquema del disipador y localización de los diversos tipos de sensores instalados

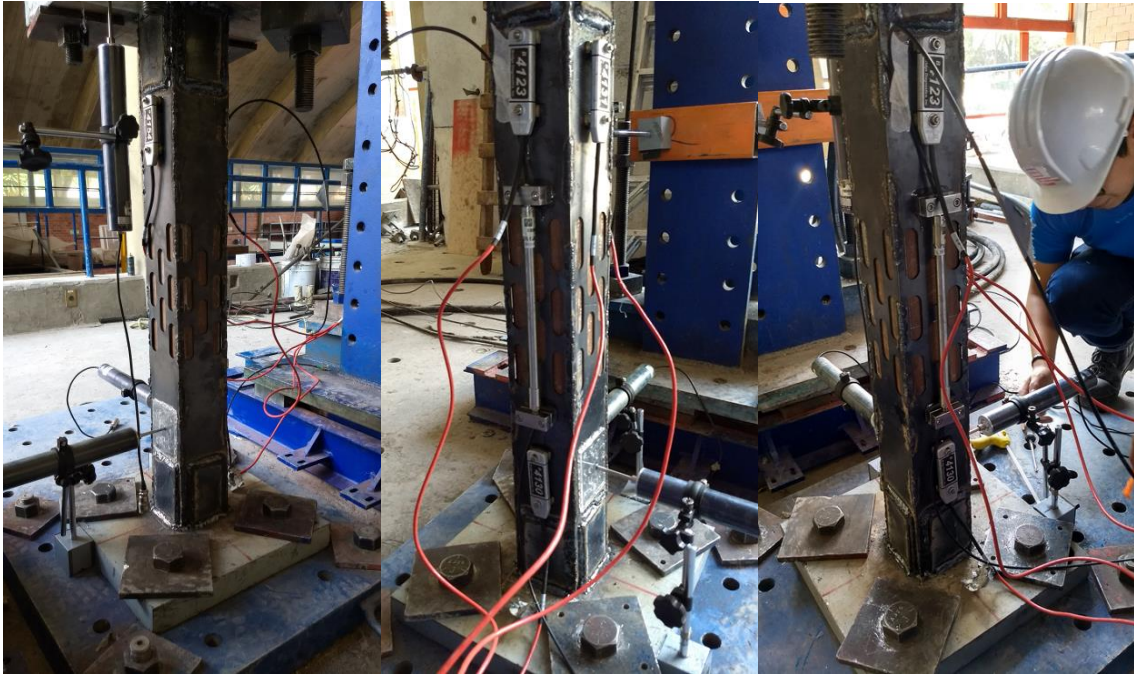


Figura 5.5.29 Instalación de los instrumentos de medición sobre el disipador de energía

Este disipador se caracteriza por contar con un solo SFO, esto debido las limitaciones de espacio para su instalación y a que no se conocía como sería el comportamiento del disipador y así evitar algún daño en el sensor.

Como se menciona con anterioridad, el SFO solo estuvo presente en la etapas 01 y 02, siendo retirado cerca del final de la etapa 02, esto fue debido al comportamiento del disipador, tal como se muestra en la figura 5.5.30, en donde se observa un pandeo de las placas laterales en la parte central.



Figura 5.5.30 Momento en el que el SFO tuvo que ser retirado por el contacto con los elementos deformados del disipador

5.5.4.3 Análisis e interpretación de resultados del disipador Tipo 04

Para este experimento el sensor de fibra óptica alcanzó sus límites de operación y llegó a un punto en el que se desprendió de la superficie donde fue adherida, en ese momento se optó por retirar el sensor por precaución, pero se continuó con la captura de datos con los deformímetros BDI.

Información capturada por los sensores de fibra óptica y sensores BDI

Los datos capturados por los sensores de fibra óptica se muestran a continuación:

Etapas 01

La información capturada por el sensor de fibra óptica:

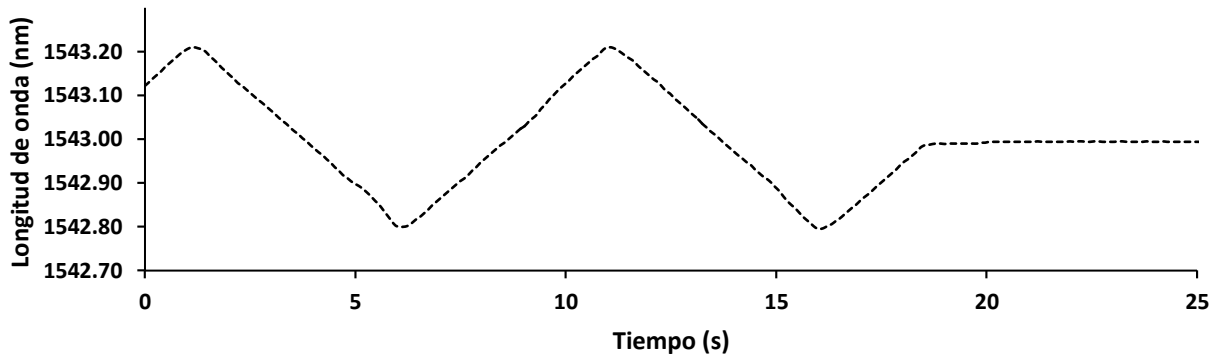


Gráfico 5.5.71 Etapa 01 - Datos capturados por el SFP (TS12-040)

Los datos capturados por los BDI se muestran a continuación:

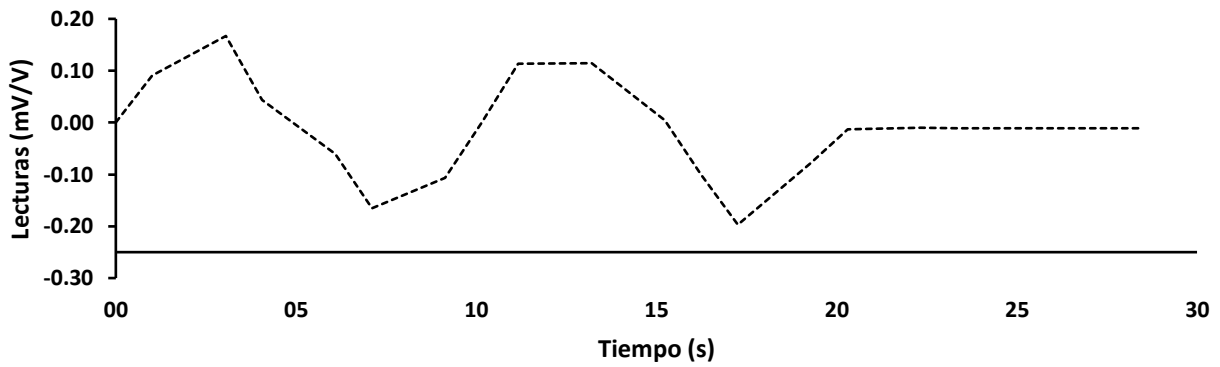


Gráfico 5.5.72 Etapa 01 - Datos capturados por el BDI (D4123)

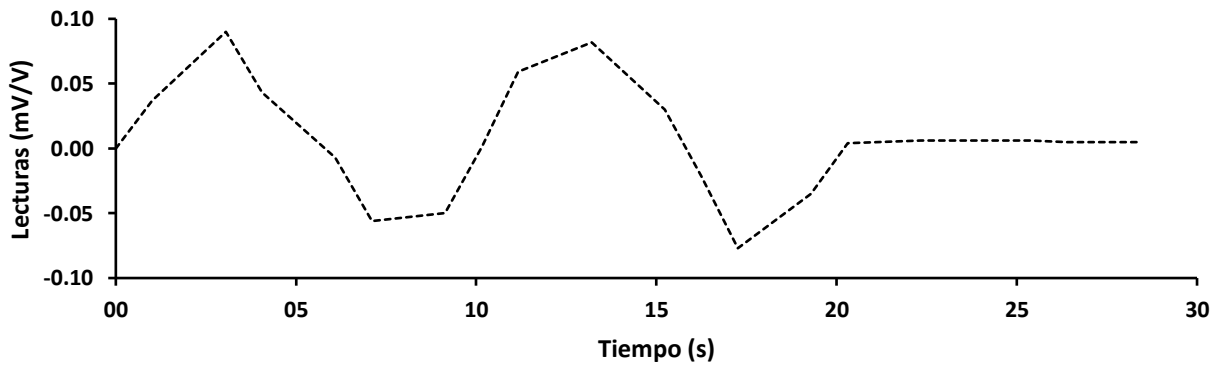


Gráfico 5.5.73 Etapa 01 - Datos capturados por el BDI (D4130)

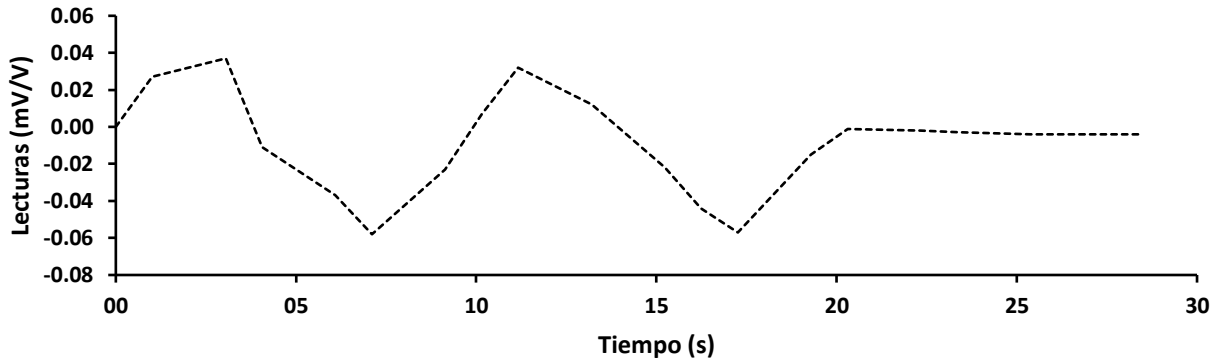


Gráfico 5.5.74 Etapa 01 - Datos capturados por el BDI (D4131)

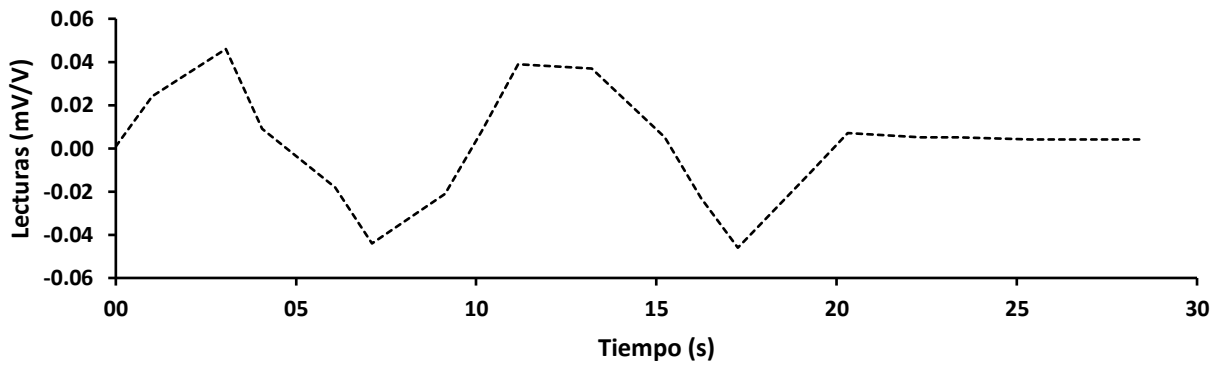


Gráfico 5.5.75 Etapa 01 - Datos capturados por el BDI (D4154)

Etapa 02

La información capturada por el sensor de fibra óptica:

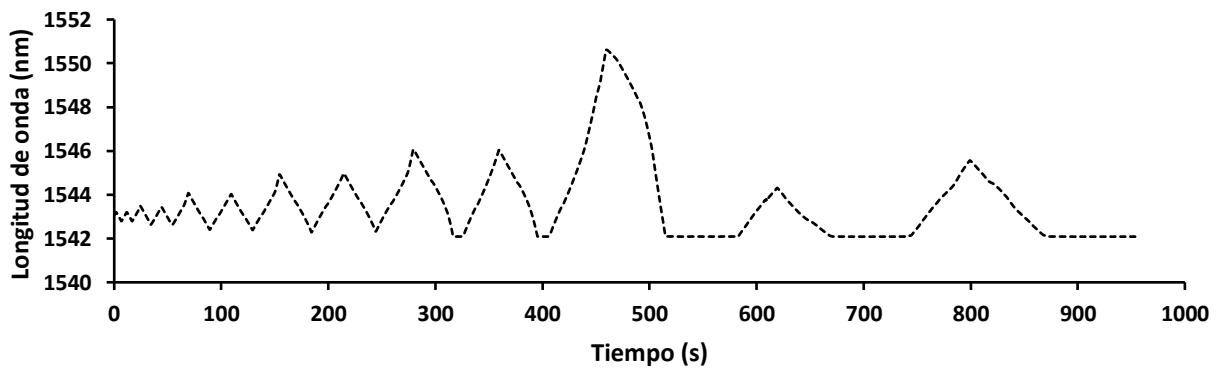


Gráfico 5.5.76 Etapa 02 - Datos capturados por el SFO (TS12-040)

Los datos capturados por los BDI se muestran a continuación:

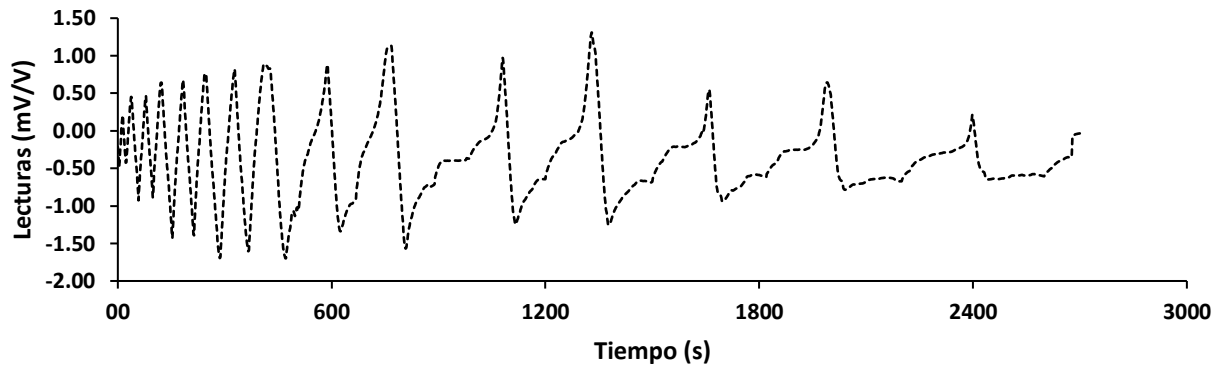


Gráfico 5.5.77 Etapa 02 - Datos capturados por el BDI (D4123)

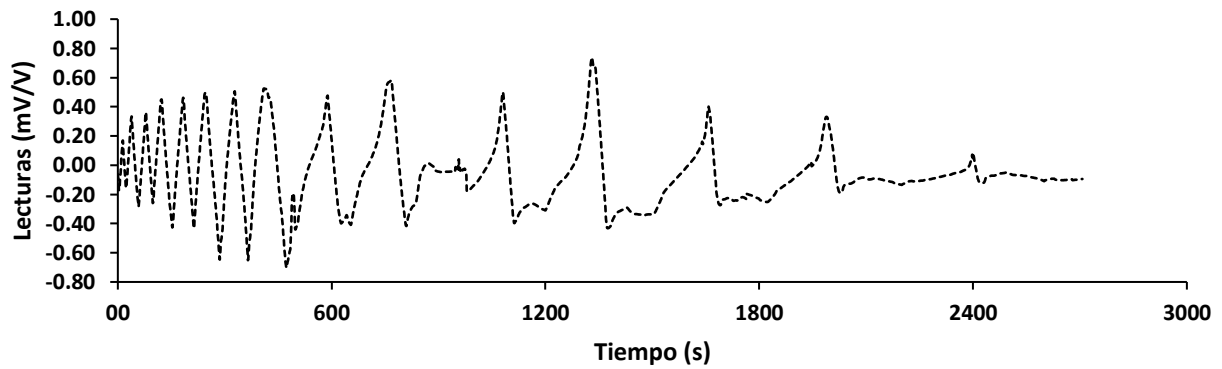


Gráfico 5.5.78 Etapa 02 - Datos capturados por el BDI (D4130)

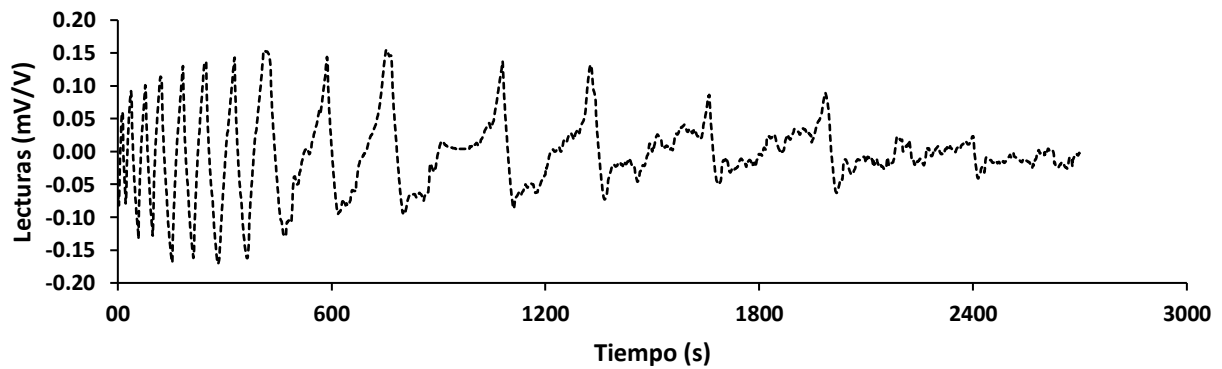


Gráfico 5.5.79 Etapa 02 - Datos capturados por el BDI (D4131)

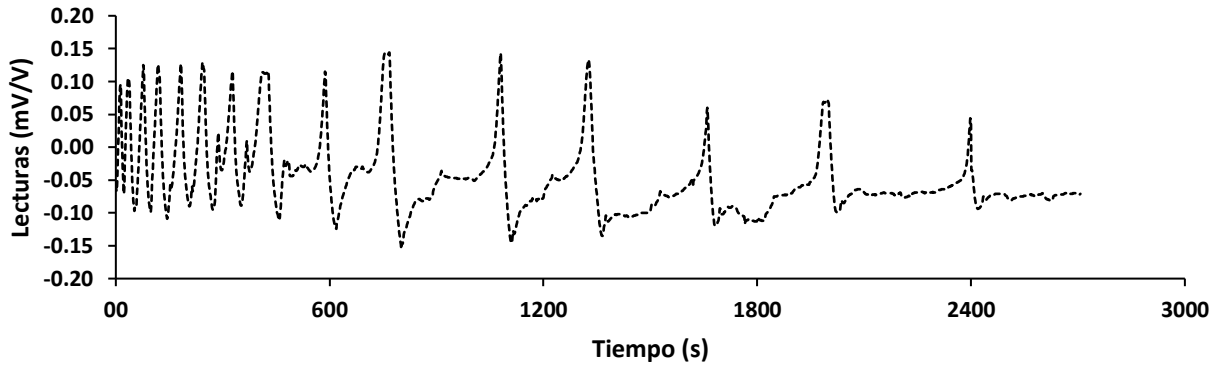


Gráfico 5.5.80 Etapa 02 - Datos capturados por el BDI (D4154)

Etapa 03

De la información capturada por los deformímetros tenemos:

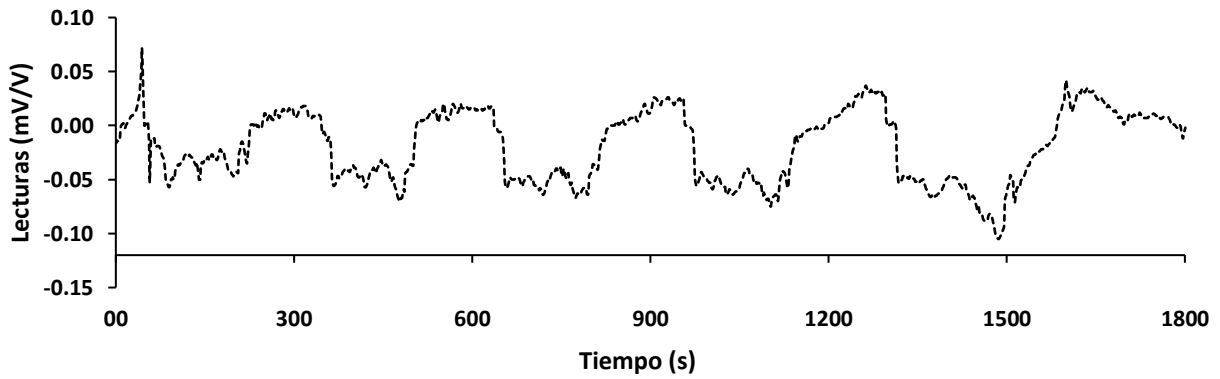


Gráfico 5.5.81 Etapa 03 - Datos capturados por el BDI (D4123)

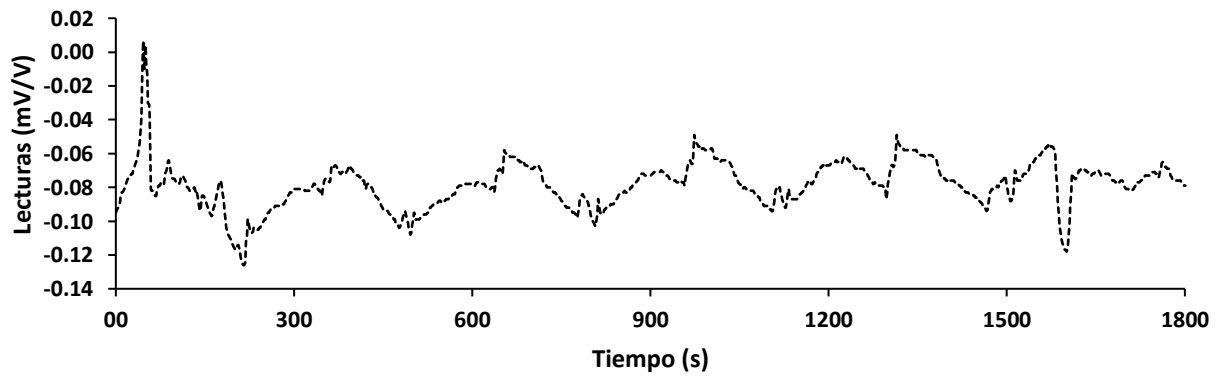


Gráfico 5.5.82 Etapa 03 - Datos capturados por el BDI (D4130)

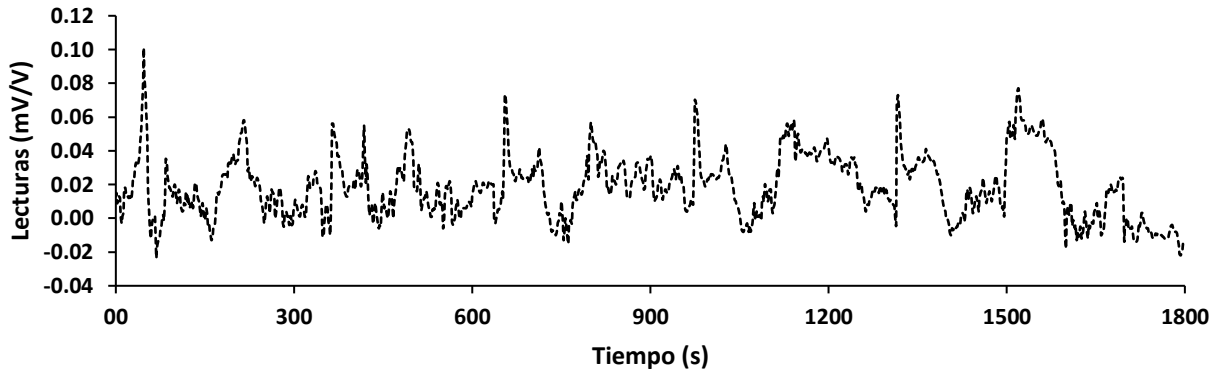
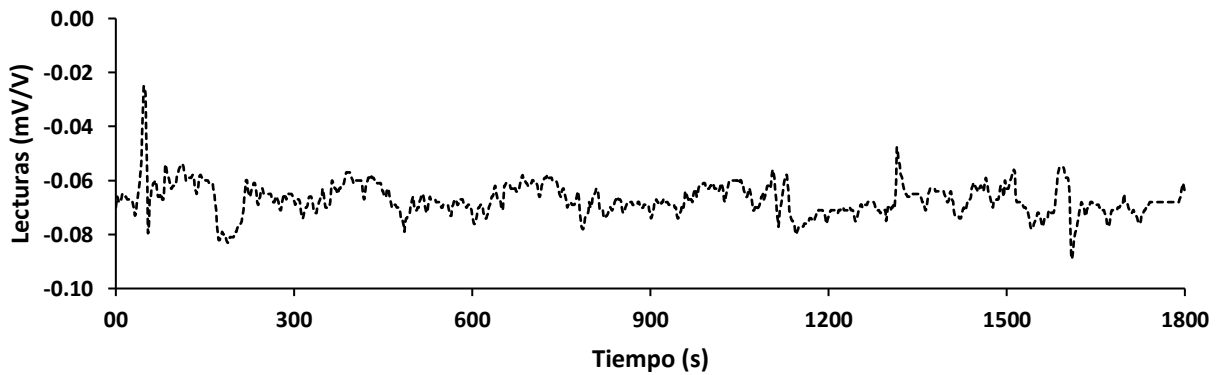


Gráfico 5.5.83 Etapa 03 - Datos capturados por el BDI (D4131)



Gráfica 5.5.84 Etapa 03 - Datos capturados por el BDI (D4154)

El siguiente paso fue el procesamiento de la información para la obtención de las deformaciones sobre las superficies de estudio.

Se siguió el procedimiento análogo para la obtención de los valores de deformación como se ha especificado en el capítulo 5.2. Los factores de galga pueden consultarse en la tabla 5.3 del capítulo 5.2.

Comparación entre los valores reportados por los sensores de fibra óptica y deformímetros instalados en los disipadores

Vista Trasera

En la vista trasera del disipador se instaló únicamente un sensor BDI (D4131), el cual no presentó ningún tipo de fallo en la adherencia u operación por lo que se partió de la idea de que el BDI actuó de forma similar al comportamiento axial del elemento. Los valores de deformación para la etapa 01 se muestran en el gráfico 5.5.85, para la etapa 02 en el gráfico 5.5.86 y finalmente para la etapa 03 en el gráfico 5.5.87.

Etapa 01

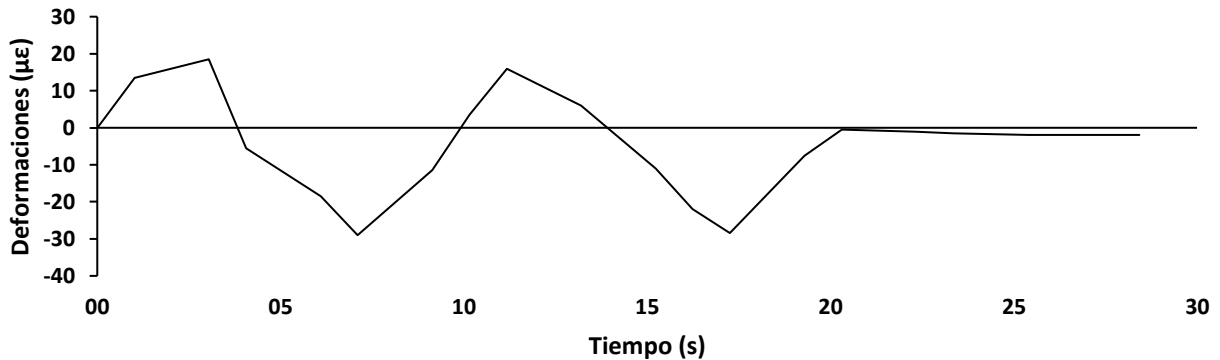


Gráfico 5.5.85 Etapa 01 - Deformaciones reportada por el BDI (D4131)

Etapa 02

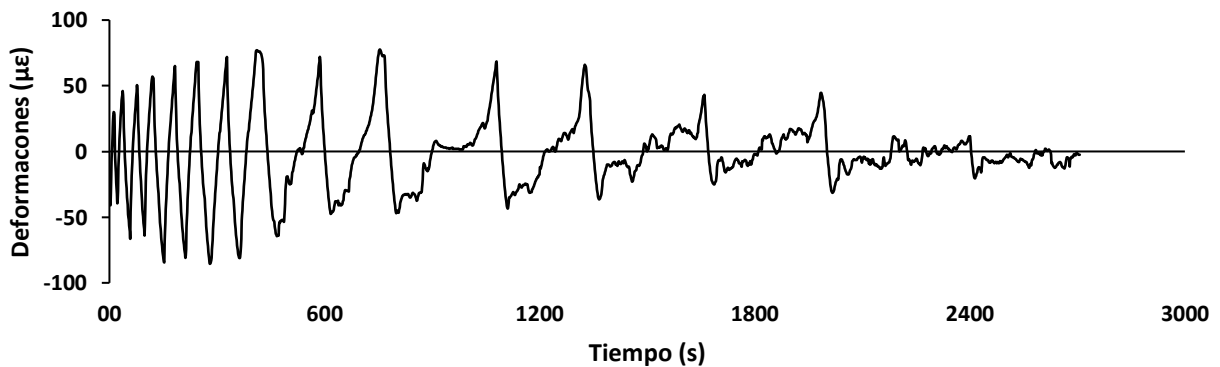


Gráfico 5.5.86 Etapa 02 - Deformaciones reportada por el BDI (D4131)

Etapa 03

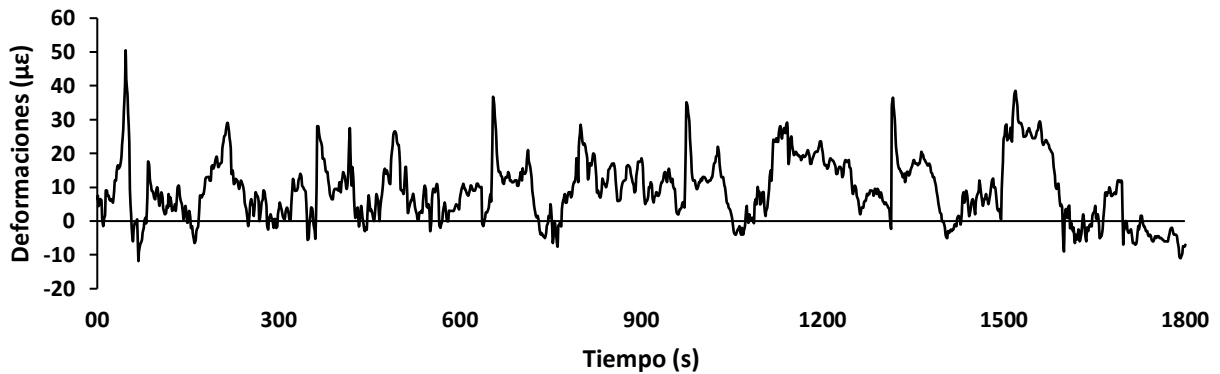


Gráfico 5.5.87 Etapa 03 - Deformaciones reportada por el BDI (D4131)

Vista Lateral Izquierda

En la vista lateral izquierda del dissipador al igual que en la vista trasera se instaló únicamente un sensor BDI (D4154), el cual no presentó ningún tipo de fallo en la adherencia u operación por lo que se partió de la idea de que el BDI actuó de forma similar al comportamiento axial del elemento. Los valores de deformación para la etapa 01 se muestran en el gráfico 5.5.88, para la etapa 02 en el gráfico 5.5.89 y finalmente para la etapa 03 en el gráfico 5.5.90.

Etapa 01

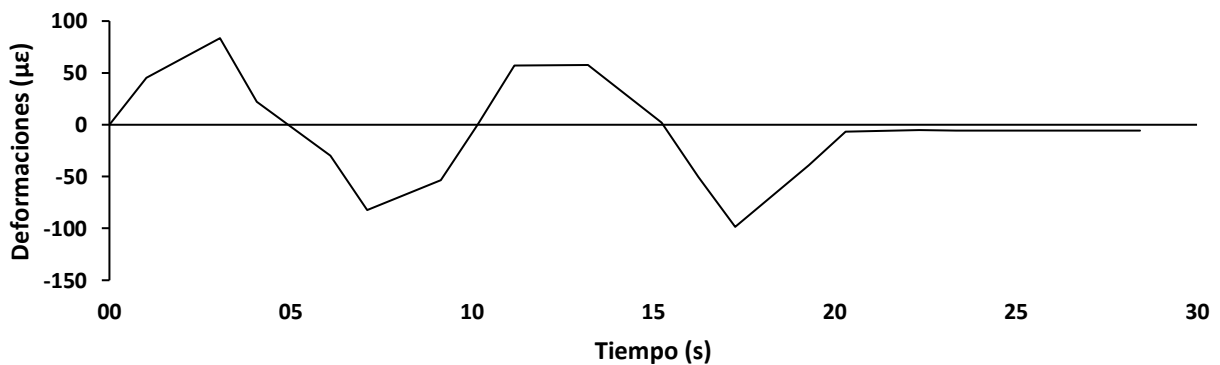


Gráfico 5.5.88 Etapa 01 - Deformaciones reportadas por el BDI (D4154)

Etapa 02

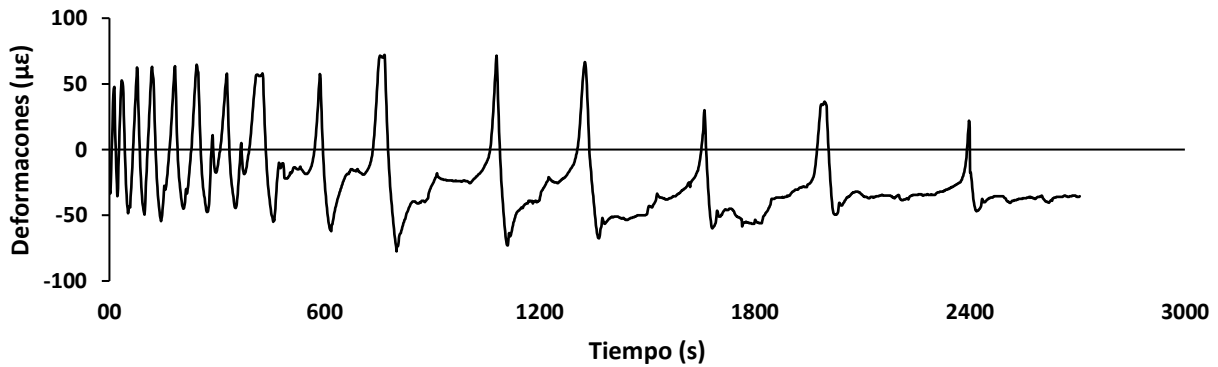


Gráfico 5.5.89 Etapa 02 - Deformaciones reportada por el BDI (D4154)

Etapa 03

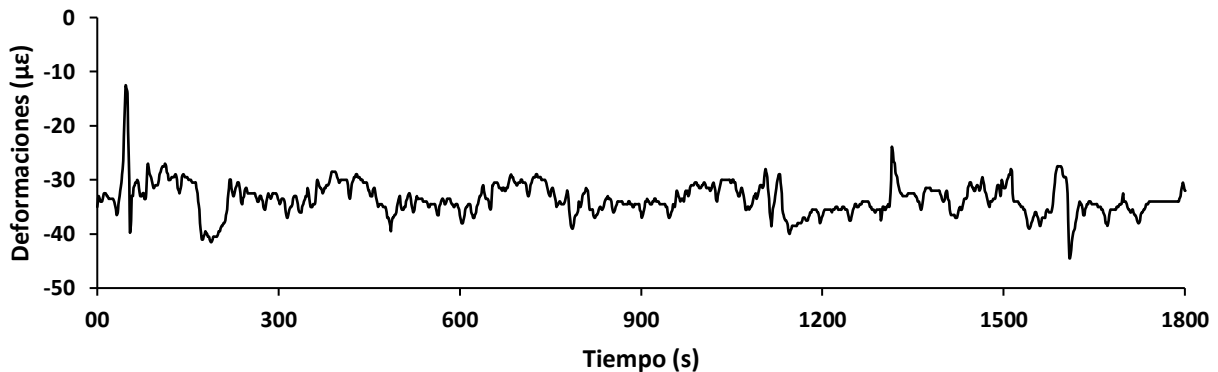


Gráfico 5.5.90 Etapa 03 - Deformaciones reportadas por el BDI (D4154)

Vista Lateral Derecha

En la vista lateral derecha se realizó un arreglo en el que los sensores instalados se ubicarían sobre el mismo eje longitudinal a diferencia de las otras pruebas realizadas, para esto se hizo uso de un SFO (TS12-40) y dos BDI (D4123 y D4130), cabe recordar que el SFO tuvo que ser retirado a unos instantes de finalizar la etapa 02, esto debido a las deformaciones del cuerpo confinante del dissipador.

Como se observa en la figura 5.5.30 el dissipador empezó a tener contacto con el SFO, lo cual comenzó a afectar las lecturas debido a que las propiedades de un SFO son distorsionadas cuando se le aplica una presión transversal. Además, como se observa en el gráfico 5.5.76, cerca del segundo 300, el sensor alcanzó su límite de operación inferior, es por eso que de ahí en adelante no se capturaron datos menores a 1572 (nm).

Etapa 01

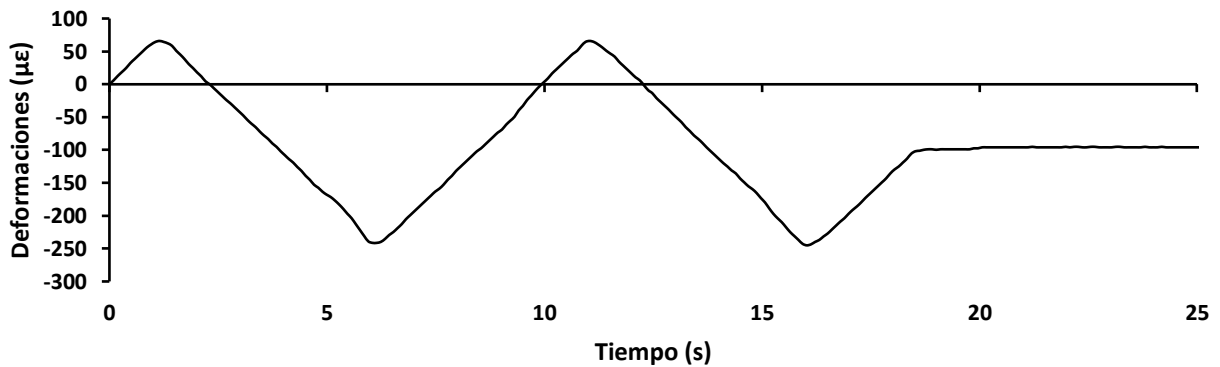


Gráfico 5.5.91 Etapa 01 - Deformaciones reportadas por el SFO (TS12-040)

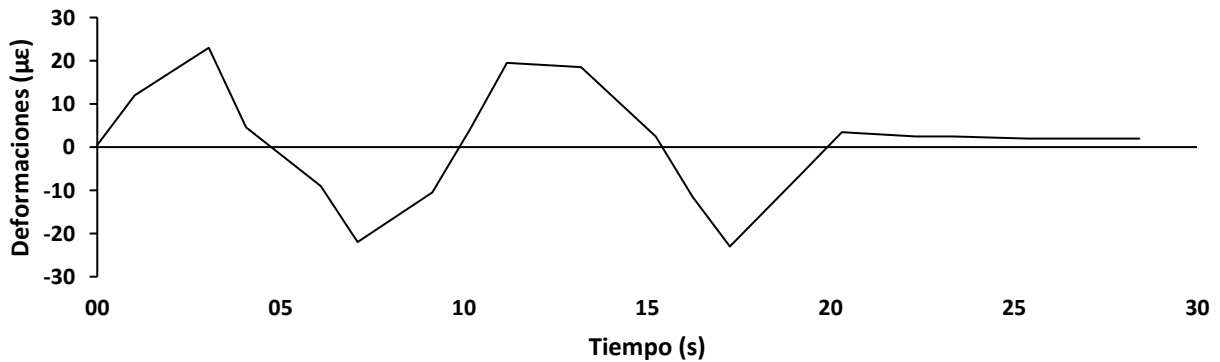


Gráfico 5.5.92 Etapa 01 - Deformaciones reportadas por el BDI (D4123)

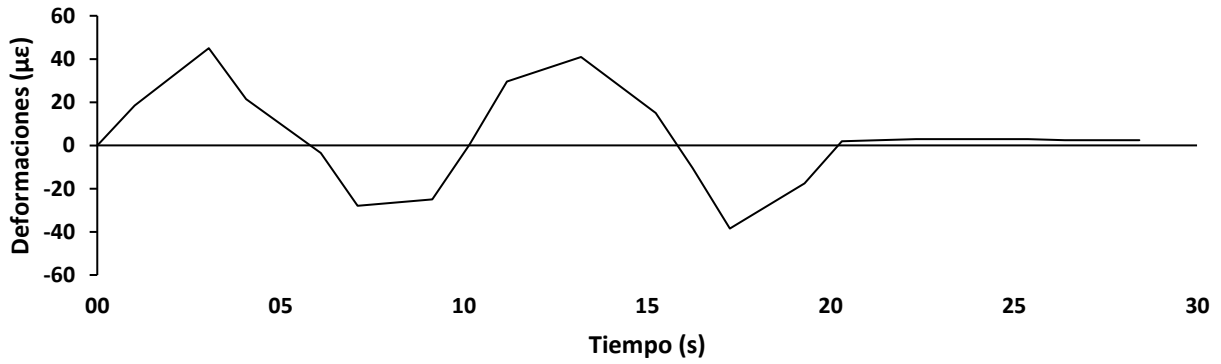


Gráfico 5.5.93 Etapa 01 - Deformaciones reportadas por el BDI (D4130)

Etapa 02

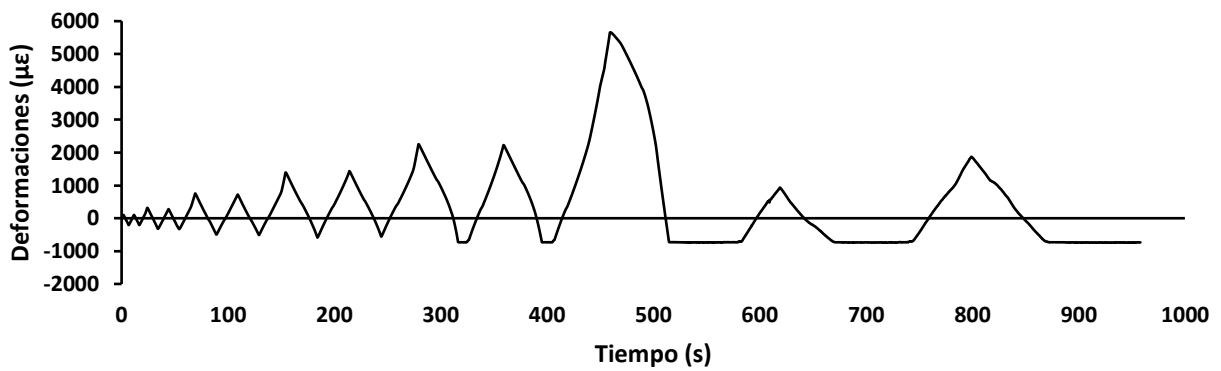


Gráfico 5.5.94 Etapa 02 - Deformaciones reportadas por el SFO (TS12-040)

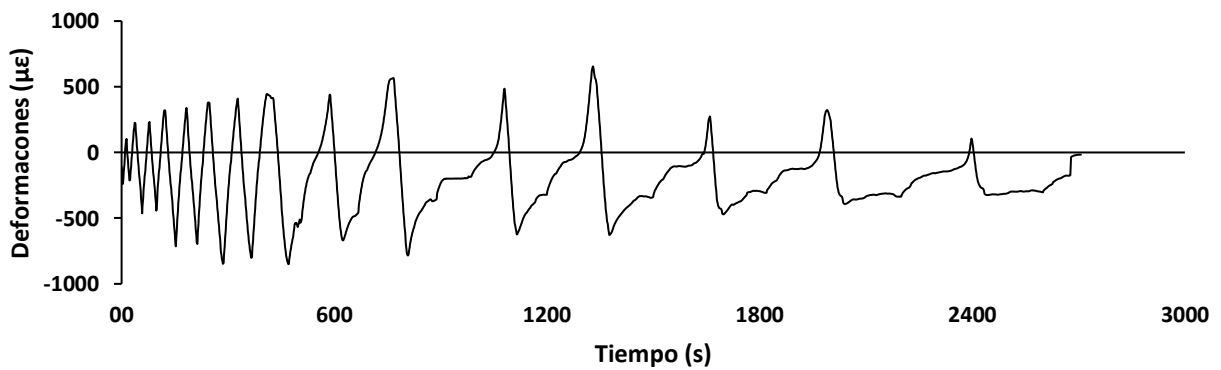


Gráfico 5.5.95 Etapa 02 - Deformaciones reportadas por el BDI (D4123)

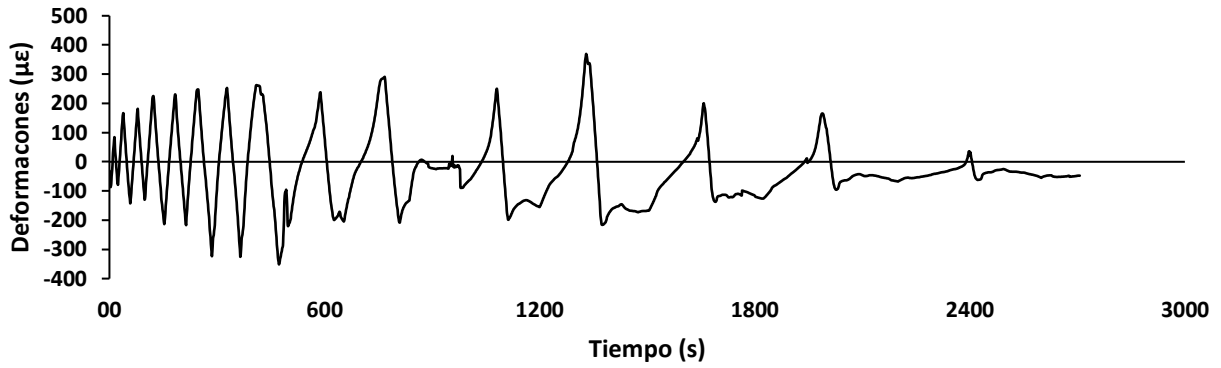


Gráfico 5.5.96 Etapa 02 - Deformaciones reportadas por el BDI (D4130)

Etapa 03

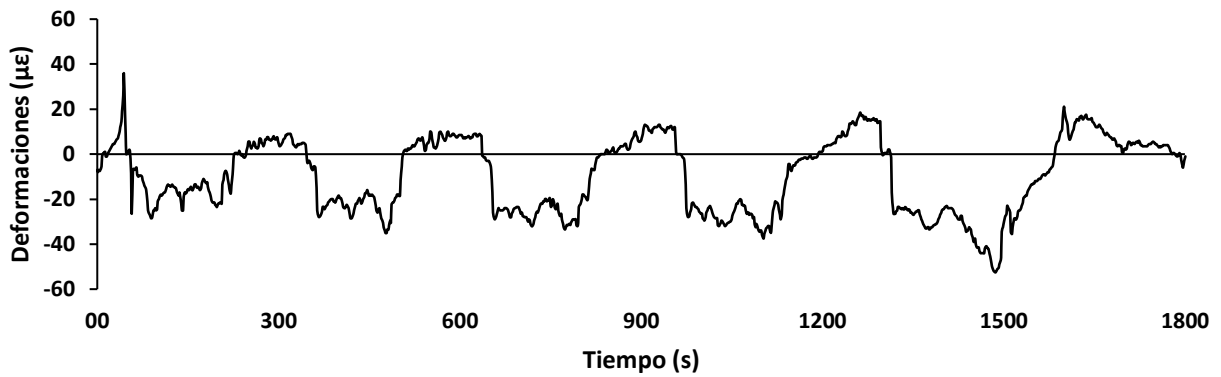


Gráfico 5.5.97 Etapa 03 - Deformaciones reportadas por el BDI (D4123)

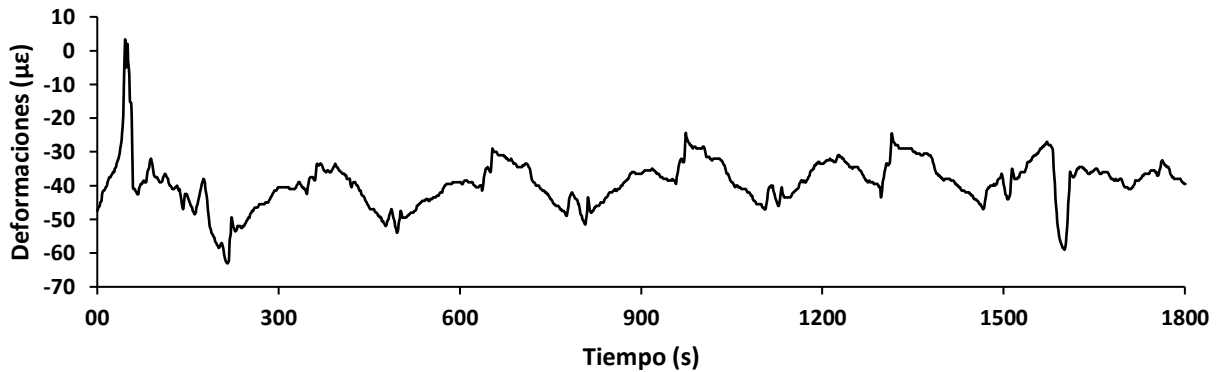


Gráfico 5.5.98 Etapa 03 - Deformaciones reportadas por el BDI (D4130)

Superposición de los valores reportados de deformación para sensores sobre la misma superficie

Ahora se presenta una comparación gráfica de las deformaciones obtenidas en la cara lateral derecha proporcionadas por el SFO (TS12-040) y los BDI (D4123 y D4130) los cuales instalaron a lo largo del mismo eje vertical.

Etapa 01

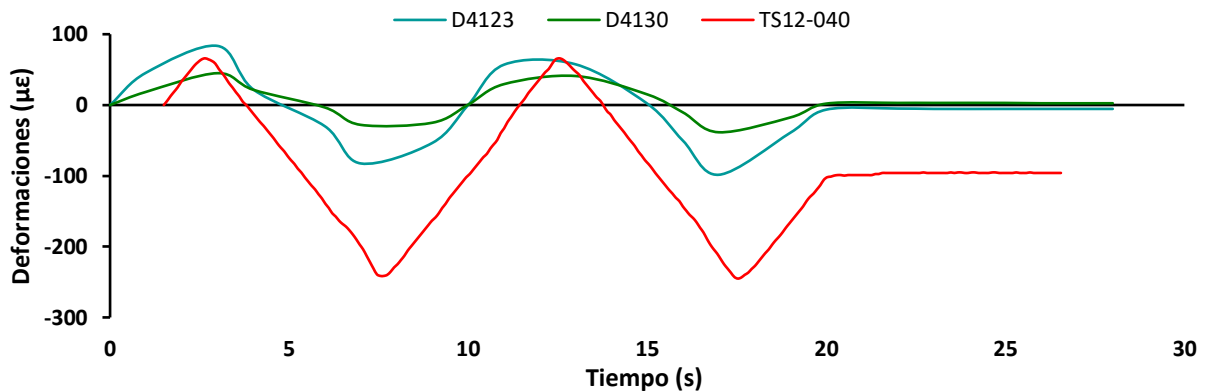


Gráfico 5.5.99 Etapa 01 - Comparación gráfica de los BDI (D4123 y D4130) y el SFO (TS12-040)

Etapa 02

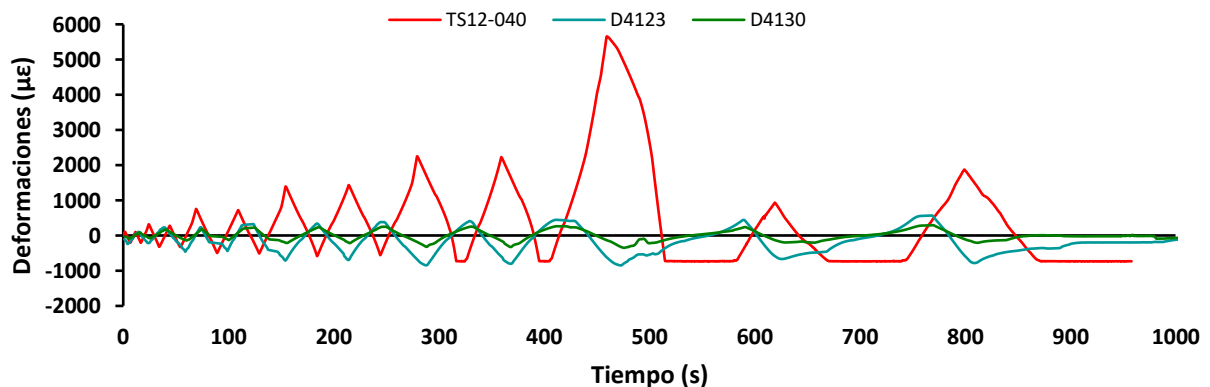


Gráfico 5.5.100 Etapa 02 - Comparación gráfica de los BDI (D4123 y D4130) y el SFO (TS12-040)

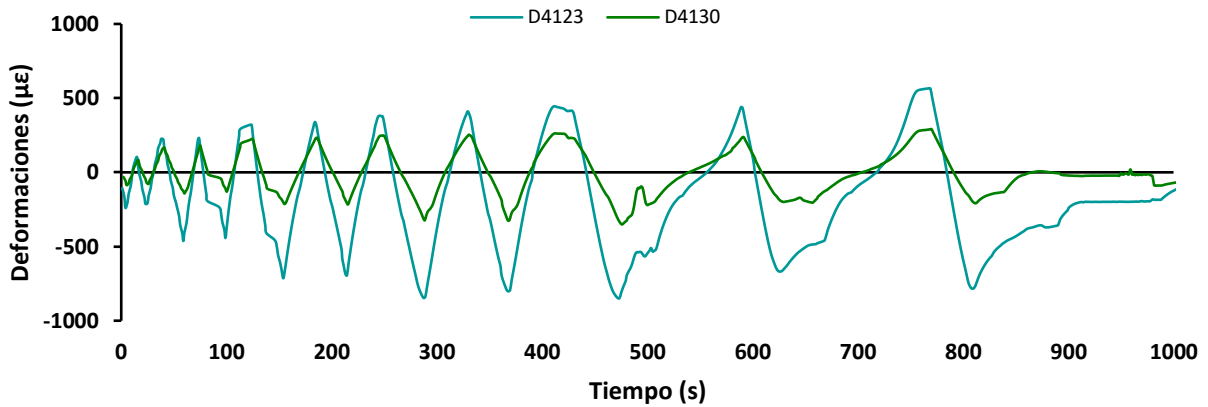


Gráfico 5.5.101 Etapa 02 - Comparación gráfica de los BDI (D4123 y D4130)

Etapa 03

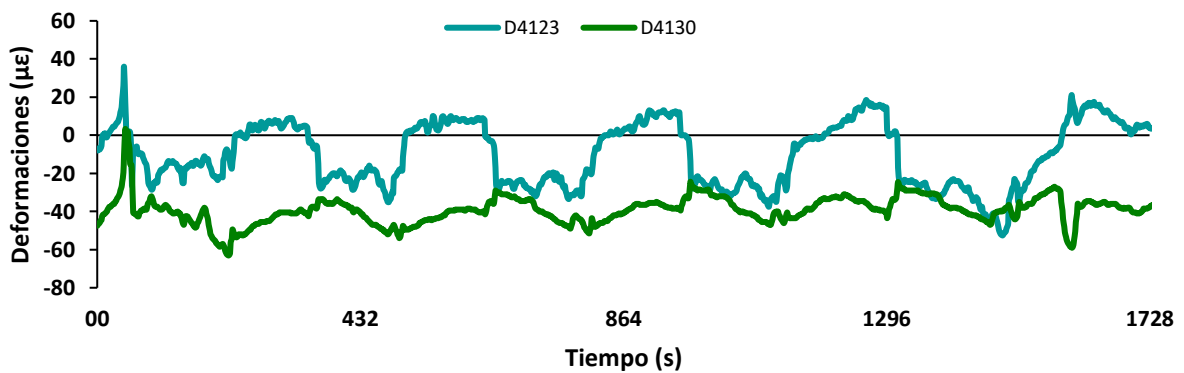


Gráfico 5.5.102 Etapa 03 - Comparación gráfica de los BDI (D4123 y D4130)

Finalmente, de los gráficos obtenidas para la comparación entre sensores se comenta lo siguiente:

Etapa 01

Como se puede ver en el gráfico 5.5.99 para la etapa 01 los sensores siguieron la tendencia del actuador teniendo que se reportaron mayores valores de deformación en la parte central del dissipador y teniendo que en los extremos los valores de deformación fueron menores.

Etapa 02

Para la etapa 02 se puede apreciar que el SFO reportó valores de deformación altos en comparación de los BDI. Finalmente se puede comentar que tal como se ve en la figura 5.5.101 los BDI a pesar de estar en extremos opuestos presentaron un comportamiento similar, siendo que el BDI-D4123 reportó valores de deformación más altos en comparación del BDI-D4130.

Etapa 03

Como se observa en el gráfico 5.5.102, ambos BDI siguen la tendencia de la carga aplicada por el actuador. Por otra parte, el sensor BDI-D4123 presenta variaciones de deformación mayores que el BDI-D4130.

Capítulo 6

Conclusiones finales

6.1 Conclusiones y Comentarios finales

Como resultado de la ejecución de las pruebas mencionadas se ha podido entender de mejor manera el funcionamiento de los sensores que se han usado en este trabajo.

Tras la ejecución de las pruebas se concluye que es de vital importancia conocer los procedimientos de instalación y operación de los sensores. Debido a esto, resultaron los apartados 5.1 y 5.2 que tienen la función de guía unificada para la instalación de cada uno de los sensores.

Respecto a los resultados reportados por los sensores, se pueden resaltar los apartados 5.3.1 y 5.3.2, en donde se realizó una comparación de las deformaciones obtenidas experimentalmente con las obtenidas mediante un desarrollo teórico y un modelo de elementos finitos. En estos capítulos se observa la certeza y confiabilidad de cada sensor cuando se comparan los porcentajes de error entre los valores de módulo de elasticidad.

El uso de los sensores en los casos de estudio del muro de adobe y los disipadores de energía fueron de utilidad para obtener información acerca del comportamiento de los sensores cuando la demanda de deformación y carga aplicada es mayor, por lo que finalmente se da la siguiente recomendación:

- En el caso de los SFO, si es posible se deben conocer las deformaciones máximas a las que estará sometido el sensor para que este no rebase su límite de operación.

6.2 Sugerencias de aplicación para cada tipo de sensor

Teniendo en cuenta los siguientes parámetros de comparación entre sensores, se mencionan también algunas sugerencias de aplicación:

- *Facilidad y tiempo de instalación:*

Como se observó en el capítulo 5.1, en cuanto a instalación los DE son los sensores que requieren de más tiempo (hasta un día en ser colocados), de personal capacitado, de cuidado, manejo minucioso de las herramientas usadas y de materiales especiales para llevar a cabo el proceso, por lo que se recomienda su uso en estudios experimentales en laboratorio, ya que se tendrán condiciones más controladas que en campo.

En contraste, los BDI, SCV y SFO tienen un procedimiento de instalación más sencillo y corto, por lo que el campo de aplicación recomendado es más amplio; estudios experimentales en laboratorio, monitoreo de estructuras en campo cuando el tiempo de instalación sea limitado y cuando no se cuente con personal capacitado.

- *Frecuencia de muestreo*

La frecuencia de muestreo se entiende como el intervalo de tiempo que ocurre entre la captura de un dato y el siguiente. Teniendo en cuenta los sensores usados en este trabajo, el que tiene mayor frecuencia de muestreo es el SFO con 250 muestras por segundo, por lo cual este dispositivo podría tener un excelente desempeño en pruebas estáticas y en pruebas dinámicas, es decir en donde el parámetro de deformación cambie considerablemente en un segundo, por ejemplo, experimentos en una mesa vibradora o el estudio de comportamiento sísmico de una estructura real.

Para los SCV, DE y BDI la frecuencia de muestreo que se utilizó estuvo alrededor de una muestra por segundo, debido a que la respuesta del sensor no es inmediata, por lo cual dichos sensores se recomiendan para pruebas estáticas.

- *Desempeño*

Se valoró el desempeño de cada sensor en base a las ventajas y desventajas que se presentaron en el capítulo 4 y en base a lo aprendido en los experimentos.

Finalmente tienen las siguientes recomendaciones:

- ✓ Los DE se recomiendan para un uso en laboratorio y para el estudio de puntos específicos al ser sensores puntuales, con la ventaja de ocupar una menor extensión en comparación de los demás sensores.
- ✓ Los SCV se recomiendan para pruebas en donde se requiera conocer la variación de las temperaturas, ya que el sensor registra un historial de los cambios de temperatura en el ambiente.
- ✓ Los BDI se recomiendan en laboratorio y en campo, esto debido a la facilidad de uso y por la resistencia de los materiales del sensor.
- ✓ Los SFO se recomiendan para un uso en laboratorio y también en campo, especialmente en estructuras en donde se requiera instrumentar un espacio grande pues la capacidad de conectar los sensores en serie, ofrece una ventaja que ninguno de los otros ofrece.

Bibliografía

- Branko Glišić, Daniele Inaudi. (2007). *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. Londres, Inglaterra: Wiley.
- Cevera Ruiz M. et al. 2003. *Mecánica de Estructuras Libro 1 Resistencia de Materiales*. Segunda edición Barcelona. Editorial Politext
- Chang P. (2003) *Health Monitoring of Civil Infrastructure* Structural Health Monitoring.
- *Clius Silva. (1987) Leonardo Da Vinci y la flexión en vigas*
- E. Jaramillo S. (2011). *Un análisis de la resistencia de materiales a partir de los postulados de "Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos Nuevas Ciencias" de Galileo Galilei*. Lámpaskos.
- GEOKON, *"Manual de Instrucciones Modelo 4000 (y 4500) Deformímetro de Cuerda Vibrante"*, Estados Unidos, 2010.
- *Guerrero, H. (2019) Proyecto Interno R938, Instituto de Ingeniería, UNAM*
- Inaudi Daniele *Fiber Optic Sensor Network for the Monitoring of Civil Engineering Structures* (Tesis doctoral). Écoles Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO, (*Strain Gages*) *"What's a STRAIN GAGE?"*, Japón, 2005
- MICRON OPTICS, *"Optical Strain Gage Offerings Continue to Grow"*. Estados Unidos 2016
- Rodríguez G. *Monitorización de Estructuras de Hormigón Mediante Sensores de Fibra Óptica Distribuida* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- *Sánchez A.R. y Villa J.G. (2018) "Seguimiento de la integridad de edificios históricos que podrían verse afectados por la construcción del túnel y de lagunas estaciones de la Línea 3 del Tren Ligero de Guadalajara. Proyecto 8557. Instituto de Ingeniería UNAM.*
- Siguardotir, B. Glissic (2015). *On-site validation of fiber-optic methos for structural health monitoring: Streicker Bridge*. J Civil Structural Health Monitoring

-
- *Timoshenko S. P, Gere J. M. (1984) Mecánica de Materiales (Segunda edición). Estados Unidos. Grupo Editorial Iberoamérica.*
 - *Villa Montes, 2019. Uso de mallas sintéticas en el refuerzo de muros de adobe de edificios históricos. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional*
 - *Referencia 1.1: Imagen recuperada de:
https://www.google.com/search?q=leonardo+da+vinci&rlz=1C1AVNG_*
 - *Referencia 1.2: Imagen recuperada de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias>*
 - *Referencia 1.3: Imagen recuperada de:
<https://www.google.com/search?q=galileo+galile>*
 - *Referencia 1.4: Imagen recuperada de: <https://personajeshistoricos.com/c-cientificos/robert-hooke/>*
 - *Referencia 1.5: Imagen recuperada de:
<https://www.google.com/search?q=extensometros+mecanicos&rlz>*
 - *Referencia 1.6: Imagen recuperada de: Encardio Rite, *Strain Gauge: Principle, Types, Features and Applications*, recuperado de:
<https://medium.com/@encardio/strain-gauge-principle-types-features-and-applications-357f6fed86a5>*
 - *Referencia 1.7: Imagen recuperada de: Indiamart, *CDP Strain Displacement Transducer*, recuperado de: <https://www.indiamart.com/proddetail/cdp-strain-displacement-transducer-14857304833.html>)*
 - *Referencia 1.8: Imagen recuperada de:
<http://www.micronoptics.com/product/surface-mount-strain-sensor-os3610/>*