

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE
INSTRUMENTACION CLÁSICA DE GALGAS
EXTENSIOMÉTRICAS Y SENSORES
ÓPTICOS PARA LA MONITORIZACIÓN EN
UNA CÉLULA DE CARGA**

(Comparative analysis between the classical
approach by means of gauge extensometers
and optical sensors for the monitoring of load
cells)

Para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: Carlos Diego Alonso

Febrero – 2015



INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: Carlos Diego Alonso
Director del PFC: Jesús Mirapeix Serrano, Luis Rodríguez Cobo
Título: “Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga”
Title: “Comparative analysis between the classical approach by means of gauge extensometers and optical sensors for the monitoring of load cells “

Presentado a examen el día: 26 de Febrero de 2015

para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre):	Quintela Incera, Antonio
Secretario (Apellidos, Nombre):	Mirapeix Serrano, Jesús Rodríguez Cobo, Luis
Vocal (Apellidos, Nombre):	Pascual Gutiérrez, Juan Pablo

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera N°
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos:

En primer lugar agradecer a mi familia, mis padres y mi hermana por el apoyo en estos años, aguantando los buenos y malos momentos.

A mi pareja, que siempre me ha apoyado y levantado en los malos momentos que he sufrido en esta carrera.

A mi abuelo y mi tío.

Mis compañeros de la universidad y amigos, ellos directa o indirectamente también forman parte de este proyecto.

Por su puesto, a los miembros del Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Caminos: Carlos Alonso, Javier Torres, Alvaro Gaute, Javier Sánchez y Leoncio Roche.

Gracias a Jesús por todo lo que me ha enseñado y aconsejado durante los últimos meses y aún más en la elaboración de este documento, a Luis, por su colaboración y su ayuda.

Índice

0. Objetivos y Contexto	5
1. Monitorización y sensado en diferentes ámbitos.....	12
2. Estado del Arte	15
2.1. Concepto de esfuerzos y deformación:	15
2.2. Sensado tradicional:	17
a) Galgas extensiométricas.....	17
b) Medidas con galgas extensiométricas.	18
c) Procedimiento de adhesión de las galgas extensiométricas sobre las probetas.	22
2.3. Sensores basados en fibra óptica	25
a) La fibra Óptica	25
b) Redes de Bragg.....	29
c) Brillouin	35
d) Procedimiento de adhesión del sensor óptico sobre las probetas.	38
3. Experimental	40
3.1 Contexto de trabajo típico	40
3.2 Medidas experimentales	40
a) <i>Setup</i> de montaje de la Célula de Carga.	40
b) <i>Setup</i> de montaje de la Barra Corrugada.	48
c) Resultados obtenidos.	50
4. Conclusiones y Líneas Futuras.....	59
5. Referencias.....	62
6. Anexos Técnicos	64

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Tabla de Figuras:

<i>Figura 0- 1 Viaducto del Tajo. Tramo de AVE Cañaveral-Embalse de Alcántara.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 0- 2 Célula de Carga en uno de los tirantes del Viaducto del Tajo</i>	<i>6</i>
<i>Figura 0- 3 Barra Instrumentada en una de las fases de construcción del arco del Viaducto del Tajo</i>	<i>6</i>
<i>Figura 0-4 Sonda de Temperatura y Anemómetro ultrasónico.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 0- 7 Inclinómetros</i>	<i>7</i>
<i>Figura 0- 8 Equipo de Adquisición de Datos de NI.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 0. 9 Célula de Carga Instalada en un Perno de una Torre Eólica.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 0- 10 Plano AutoCad de Célula de Carga</i>	<i>10</i>
<i>Figura 1- 1 A Acelerómetro en tirante. Cuerda vibrante.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1- 3 Arcos de Alconétar</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2- 1 Gráfica Tensión-Deformación.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2- 2 Esquema de galgas extensiométricas.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2. 3 Esquema básico de un Puente de Wheatstone.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. 4 Puente de Wheatstone con Compensatoria de Temperatura</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2- 5 Superficie de Célula sin Lijar</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2- 6 Superficie de Célula Lijada.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2- 7 Adhesión de galga.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2- 8 Protección contra humedad</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2- 9 Rebaje de Corruga en la Barra.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2- 10 Estructura básica sensor Óptico</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2. 11 Sensores Localizados o puntuales</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2. 12 Sensores Distribuidos</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2- 13 Red de Bragg.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2- 14 Comportamiento espectral de un FBG</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2- 15 Tipos de redes de Bragg: (a) FBG, (b) LPG, (c) CFG, (d) TFG, (e) SFG.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2- 16 Back-scattering</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2- 17 Adhesión de la fibra desnuda a la probeta</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3- 1 Puente Completo de Wheatstone en Célula de Carga</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3- 2 Configuración de Puente Completo NI-9237</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3- 3 Conexionado Puente Completo Célula de Carga N 9237</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3- 4 Setup de montaje equipos de NI.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3- 5 Célula de Presión de 400bares.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3- 6 Pórtico de ensayo con Grupo Hidráulico</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3- 7 V.I. LabView Registro de datos de la célula.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3- 8 Pegado de Gratings en Célula.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3- 9 Setup óptico: Célula de carga</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3- 10 Setup de montaje: Unidad de Interrogación y canales conectados</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3- 11 Célula de Carga Instalada en el Pórtico de Carga.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3- 12 Puente Completo de Wheatstone en Barra Corrugada</i>	<i>48</i>

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

<i>Figura 3- 13 Conexionado Puente Completo equipo NI.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3- 14 Conexionado Puente Completo Barra Calibrada NI 9237</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3- 15 Montaje de la Barra Calibrada en el Pórtico de Tracción</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3- 16 Instalación de los Gratings Ópticos a la Barra Calibrada.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3- 17 Célula de Carga. Registro Célula de Presión.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3- 18 Célula de Carga. Galgas Deformación-Tiempo.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3- 19 Célula de Carga. Gratings Ópticos Deformación-Tiempo</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3- 20 Célula de Carga. Galgas Extensiométricas Fuerza (KN)-Deformación (ustrain).....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3- 21 Célula de Carga. Gratings Ópticos Fuerza (KN)-Deformación (ustrain).....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 3- 22 Barra Corrugada. Célula presión. Fuerza (KN)- Tiempo.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3- 23 Barra Corrugada. Galgas extensiométricas. Fuerza (KN)- Deformación (ustrain)</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3- 24 Barra Corrugada. Gratings Ópticos. Tensión (KN)-Deformación (ustrain).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3- 25 Barra Corrugada. Gratings Ópticos. Fuerza (KN)-Deformación (ustrain). Corrección factor de galga.....</i>	<i>58</i>

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

0. Objetivos y Contexto

La monitorización de estructuras es una rama de la ingeniería estructural dedicada al desarrollo de sistemas que proporcionen información sobre cualquier cambio significativo o daño que se produzca en la estructura.

Actualmente, formo parte de un Grupo de Instrumentación y Análisis Dinámico de Estructuras de Obra Civil (GiaDe), perteneciente a la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria [1].

Uno de los Proyectos que se está llevando a cabo es la “Instrumentación del Viaducto del Tajo”. El Viaducto del Tajo es el elemento más sobresaliente del tramo de AVE Cañaveralembalse de Alcántara. Este viaducto tiene una longitud total de 1.488 metros con un vano central tipo arco con tablero superior de 324 metros, lo que le convierte en una referencia mundial, situándole entre los de mayor luz, del mundo dentro de su tipología; refiriéndose como *luz* a la distancia en proyección horizontal existente entre los apoyos de una viga [2].



Figura 0- 1 Viaducto del Tajo. Tramo de AVE Cañaveralembalse de Alcántara

Dentro de la instrumentación de este proyecto, mediante células de carga, se monitorizan los esfuerzos de los tirantes provisionales durante el proceso constructivo del arco. Estas células se disponen en el anclaje activo de los tirantes instrumentados y registrarán el esfuerzo total en dichos tirantes.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.



Figura 0- 2 Célula de Carga en uno de los tirantes del Viaducto del Tajo

Las tensiones estructurales que soporta el arco, también se están controlando a través de barras instrumentadas insertadas en puntos estratégicos de la ferralla, en las dovelas asignadas por el equipo de calculistas. Con esto, se obtiene en tiempo real, el comportamiento del arco, es decir, se puede controlar si el arco está trabajando a tracción o compresión y si está sufriendo flexión en alguna de las dovelas.



Figura 0- 3 Barra Instrumentada en una de las fases de construcción del arco del Viaducto del Tajo

Además de la instrumentación mencionada, se ha previsto instrumentar más puntos del Viaducto; por ejemplo, se han instalado anemómetros en las zonas más significativas, para poder hacer un estudio de la dirección y la velocidad del viento.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Debido a que se encuentra en la cuenca del río, el factor del viento es muy importante, debiéndose estudiar y evaluar para que no haya problemas de resonancia [3], etc. El otro factor inevitable son los cambios de temperatura, por ello, en diferentes puntos estratégicos del viaducto, se dispone de sondas de temperatura.



Figura 0-4 Sonda de Temperatura y Anemómetro ultrasónico.

También se dispone de inclinómetros en el arco y en las pilas, para tener controlado el ángulo de inclinación en el proceso constructivo.



Figura 0- 5 Inclinómetros

La monitorización de todos los sensores está controlado por un equipo de *National Instrument* [4]. Estos equipos hacen, en tiempo real, un registro de datos a las frecuencias indicadas por el equipo de ingenieros. Todo esto, implantado en una plataforma *online*, permite a cada uno de los miembros del equipo de ingenieros de la asistencia técnica, a los ingenieros de la constructora y al equipo de calculistas, analizar el comportamiento real del puente en tiempo real.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.



Figura 0- 6 Equipo de Adquisición de Datos de NI

Gracias a la instrumentación en "real time", se tiene un mayor control del comportamiento real de las estructuras. Aunque el equipo diseñador del puente tenga caracterizado todos los modelos de tensiones en programas de cálculo de estructuras, como puede ser el MIDAS [5], se pueden producir fenómenos muy difíciles de modelar o caracterizar, como por ejemplo el viento. Este fenómeno es el causante de catástrofes en muchos puentes del mundo como se detallará más adelante. Por esto, disponer de un control en tiempo real de lo que suceda en las estructuras es fundamental para poder prevenir y evitar posibles fallos y accidentes.

Este Proyecto está orientado a la instrumentación de una célula de carga y una barra corrugada de acero, mediante sensado basado en fibra óptica y sensado tradicional de galgas extensiométricas, permitiendo realizar una comparativa entre ambas tecnologías.

A partir de este momento se utilizará el término *probetas* para referirse a los dos elementos auxiliares pasivos que ayudan a instrumentar estructuras, es decir, a las células de cargas y a las barras corrugadas.

Estas probetas están instrumentadas con galgas extensiométricas con las que se miden las micro-deformaciones que sufre el material de las mismas. Haciendo un análisis de los datos, se obtiene en tiempo real, la fuerza ejercida en cada caso.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Uno de los principales problemas que tienen las galgas extensiométricas es la mala sensibilidad debida al campo eléctrico y esto, a pie de obra, es un factor irremediable, motivo por el cual se planteó realizar este Proyecto.

Para instrumentar un tirante de un puente pretensado se necesita una célula de carga muy pesada y de dimensiones poco manejables. Debido a esto y al coste que supone la fabricación de una célula de carga de estas dimensiones, se ha decidido hacer una célula más pequeña y luego extrapolar al tamaño de la célula inicial.

Precisamente estas células de carga más pequeñas son las que se utilizan a la hora de instrumentar el pretensado de los molinos eólicos (aerogeneradores). Se colocan entre la base del molino y la tuerca de apriete. Con la ayuda de un gato hueco hidráulico, se pretensa llegando a los valores de fuerza establecidos por el ingeniero. Gracias a esta célula de carga, se tiene controlado en tiempo real la carga establecida en cada perno.



Figura 0. 7 Célula de Carga Instalada en un Perno de una Torre Eólica

Para hacernos una idea de las dimensiones de la célula de carga que vamos a instrumentar, se adjunta un plano de AutoCAD [6] detallando las medidas.

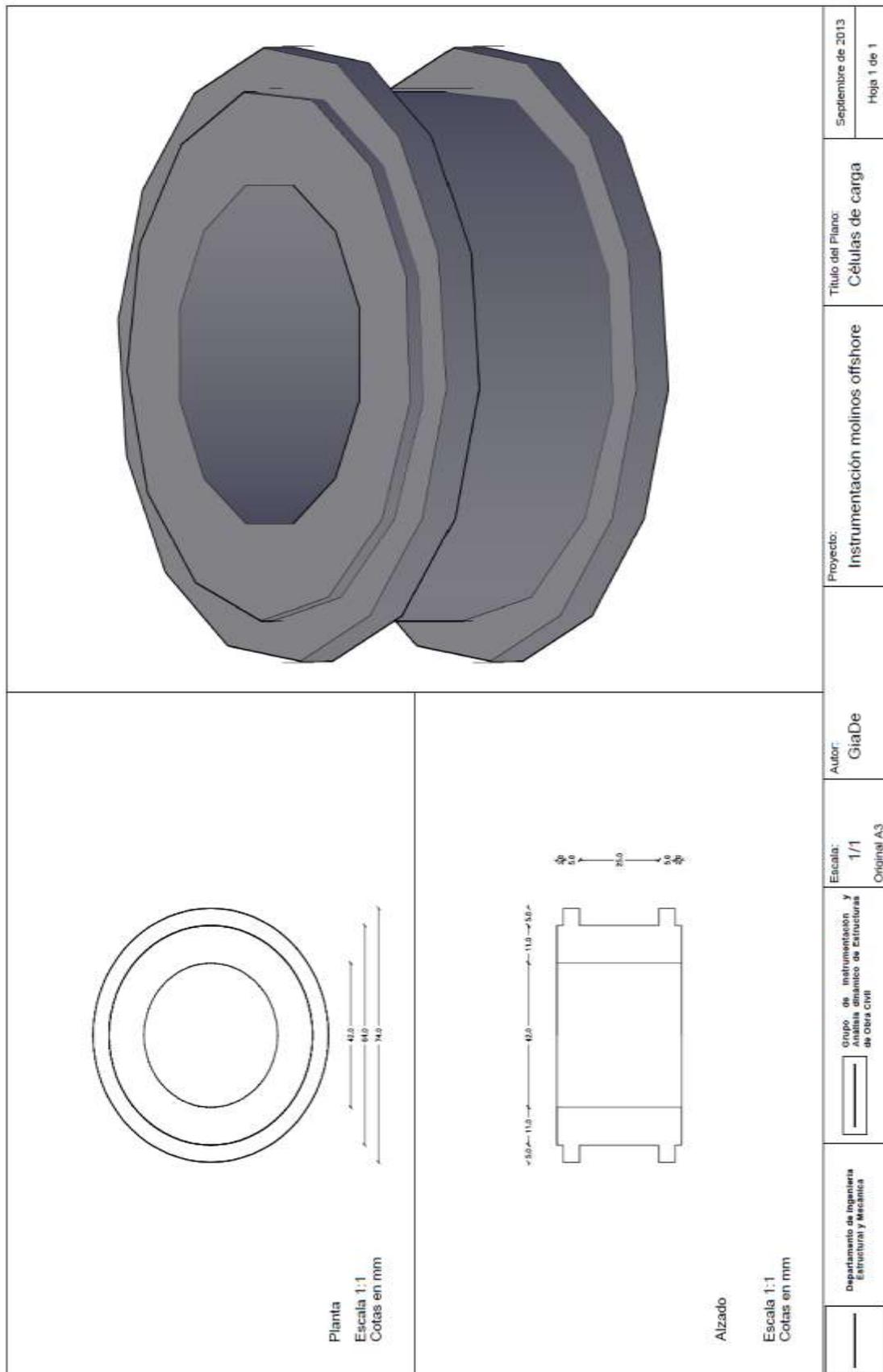


Figura 0- 8 Plano AutoCad de Célula de Carga

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

La construcción de esta célula de carga de acero se hace a través del método del torneado industrial por control numérico. Con esto se consiguen unas medidas y acabados perfectos. Es importante que el acabado en las zonas donde se van a adherir las galgas extensiométricas o en su defecto el sensor óptico, sea lo más fino y preciso posible. Más adelante se detallará la forma de adhesión de los sensores en el material.

En el caso de la barra corrugada de acero, es una pieza típica de una armadura en cualquier encofrado en este tipo de construcciones, las medidas de esta barra son 1200mm de longitud con un diámetro de 25mm.

Como cierre a este primer punto, el objetivo que se quiere obtener al final de este documento, es hacer un análisis comparativo entre la instrumentación clásica de galgas extensiométricas y la instrumentación basada en sensores ópticos para llevar a cabo una monitorización en tiempo real en una célula de carga. Para complementar la instrumentación de la célula de carga, se decide instrumentar una barra corrugada de acero, obteniendo una comparativa de ambas tecnologías.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

1. Monitorización y sensado en diferentes ámbitos

Los diferentes ámbitos donde la monitorización y el sensado se llevan a cabo hoy en día abarcan un amplio espectro de campos de aplicación, desde la Obra Civil al sector aeronáutico, el automovilístico o hasta la biomedicina.

En muchas las cadenas de montaje de cualquier sector industrial se dispone de sensores para hacer más seguro, fácil y eficaz el trabajo a realizar. Los robots de corte o soldadura en el sector metalúrgico, donde la precisión y la seguridad son esenciales, son un buen ejemplo en este sentido.

Otro caso de sensado y monitorizado, además muy cercano a la Universidad de Cantabria, es el Proyecto *Smart Santander* [7], donde gracias a miles de sensores desplegados, se puede tener controlado el número de vehículos en una determinada calle, el número de plazas libres en un aparcamiento, el estado de polución ambiental, la gestión del riego de parques y jardines, etc.

En este mismo proyecto, otros ejemplos de la utilidad de los sensores se encuentran en el ahorro energético en el sistema de alumbrado, el control de semáforos o cámaras de seguridad.

Quizá uno de los ámbitos más singulares del sensado y de la instrumentación, sea la biomedicina. El desarrollo de sistemas de robots, brazos mecánicos, etc., que ha habido en la última década, ha ayudado a mejorar en operaciones e investigaciones diversas.

El caso en el que se centra este proyecto es la monitorización estructural en el ámbito civil, SHM (*Structural Health Monitoring*). En la actualidad, la monitorización estructural tiene una gran importancia y su desarrollo está en auge, avalado por el gran número de publicaciones científica en este ámbito [8].

A continuación se detallan alguna de las causas de la importancia de la monitorización de estructuras:

- Debido al nivel de desarrollo de los países, la mayoría de las infraestructuras ya están construidas, por ello es muy importante la conservación y la rehabilitación de las mismas. Los sistemas de sensado y monitorizado pueden proporcionar datos e información para garantizar su seguridad. Por ejemplo, se obtuvieron los esfuerzos del Puente de la Arena en Muskiz Vizcaya para comprobar la vida útil de los mismos [9].



Figura 1- 1 A Acelerómetro en tirante. Cuerda vibrante.

- Cada día, debido a los avances científicos y tecnológicos, es posible proyectar y construir estructuras más complejas. En estos casos, los datos proporcionados por la monitorización de estructuras ayudan a comprobar el comportamiento real de las estructuras y a verificar la realidad con la teoría.
- Los accidentes recientes de algunas estructuras, como el colapso del puente metálico sobre el río Misisipi en Minneapolis (EEUU), el 2 de Agosto del año 2007, o un caso más cercano, el puente de Arcos de Alconétar en la autovía de la Plata, sobre el Río Tajo, que comenzó a cimbearse de manera espectacular, dan a entender la importancia de la monitorización estructural [10].



Figura 1- 2 Arcos de Alconétar

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Un sistema de monitorización se compone de los siguientes elementos: Transductores, sistemas de procesado y acondicionamiento de señal, líneas de transmisión, sistema de procesado y registro de datos.

Actualmente, existe una gran variedad de sistemas de monitorización que son aplicables a la instrumentación y evaluación de las estructuras. Algunos de los sistemas más conocidos y empleados son [11]:

- Inspección visual
- Topografía tradicional
- Métodos basados en radar
- Métodos basados en rayos X
- Métodos acústicos
- Métodos fotogramétricos
- Métodos basados en termografía
- Métodos basados en flujos magnéticos
- Sensores elastomagnéticos
- Métodos GPS
- Galgas eléctricas
- Sensado en Fibra Óptica

2. Estado del Arte

2.1. Concepto de esfuerzos y deformación:

La medida de *fuerza* es muy importante en el control de procesos. Por ello, se ha establecido una disciplina completa de la ingeniería (el análisis experimental de esfuerzos) para evaluar las fuerzas aplicadas en una pieza de cierto material [12].

La medida de fuerzas permite obtener indirectamente el valor de parámetros que son difíciles de medir directamente. Los transductores de fuerza se pueden utilizar para medir peso o cantidad de material (nivel) contenido en un tanque. La *presión*, otro parámetro clave de muchos procesos industriales, es simplemente la fuerza por unidad de área. Por tanto, se necesitan técnicas de medida de fuerzas para medir presiones. La presión en un orificio es una indicación de la velocidad con la que un fluido está fluyendo por el orificio. Por tanto, los transductores de fuerza se utilizan para medir la medida de flujo. Conociendo la fuerza aplicada a un cuerpo, podemos calcular su aceleración, velocidad y posición.

$$\begin{aligned}
 F &= m * a \\
 a &= \frac{dv}{dt} \rightarrow v = \int a dt \\
 v &= \frac{dx}{dt} \rightarrow x = \int v dt
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

En el análisis de esfuerzos es muy importante la relación entre esfuerzos y deformación. Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo, éste experimenta una deformación.

Se denomina *deformación unitaria (strain)* a la deformación por unidad de longitud o cambio fraccional de longitud que experimenta un cuerpo cuando se le aplica una fuerza, y se representa por el símbolo ϵ . La deformación unitaria puede ser tanto extensiva (positiva) como compresiva (negativa).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}
 \tag{2}$$

La deformación unitaria es adimensional, pero se suele expresar en unidades de m/m. Para la mayoría de los metales, las deformaciones unitarias que se miden experimentalmente, son típicamente menores de 0.005m/m. Puesto que los valores de las deformaciones unitarias son tan pequeños, se expresan generalmente en microdeformaciones ($\mu\epsilon$).

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

$$1 \text{ microdeformación} = 1 \mu\epsilon = 10^{-6} \epsilon \quad [3]$$

$$0.005 \text{ m/m} = 5000 \mu\epsilon = 0.5\%$$

Se define esfuerzos (*stress*) o tensión mecánica, σ , como la fuerza por unidad de sección del cuerpo al que se aplica la fuerza (tiene unidades de fuerza por unidad de superficie).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [4]$$

La deformación unitaria y el esfuerzo están muy relacionados como se indica en la figura siguiente, donde la región elástica está muy ampliada:



Figura 2-1 Gráfica Tensión-Deformación

Como podemos ver en la figura, hasta el punto denominado límite de proporcionalidad, existe una relación lineal entre esfuerzo y deformación. Esta relación se describe mediante la ley de Hooke. La pendiente de esta porción lineal es el “Módulo de elasticidad de Young”, E , del material, que tiene unidades de esfuerzo (fuerza por unidad de superficie).

$$\sigma = E * \epsilon = E * \frac{dl}{l} \quad [5]$$

Otros puntos a destacar de la gráfica deformación frente a esfuerzo, son el punto de fluencia y el de resistencia máxima. El *Punto de Fluencia* correspondiente al nivel de esfuerzo para el que la deformación comienza a crecer rápidamente aunque el esfuerzo no aumente o aumente poco. Si el material se somete a un esfuerzo mayor que el del punto de fluencia, no

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

recuperará su forma original aunque desaparezca la fuerza, sino que se mantendrá una deformación residual. La *Resistencia Máxima* corresponde al máximo esfuerzo que se puede aplicar a un material antes de que se produzca una ruptura.

2.2. Sensado tradicional:

a) Galgas extensiométricas.

Probablemente la característica eléctrica más importante que varía con el esfuerzo es la resistencia eléctrica. Las galgas extensiométricas (*strain gauge*) son transductores de fuerza que se basan en la variación de la resistencia de un conductor o un semiconductor cuando se someten a un esfuerzo mecánico (efecto piezoeléctrico). Es uno de los transductores de mayor aplicación por su pequeño tamaño, buena linealidad y baja impedancia.

Si se considera un hilo metálico de longitud l , sección A y resistividad ρ , su resistencia eléctrica R viene dada por:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad [6]$$

Si se somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor de R , experimenta un cambio, y por tanto R también cambia.

Así pues, para pequeñas variaciones de longitud, la resistencia del hilo metálico deformado, puede ponerse de la forma:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = G \cdot F \cdot \varepsilon \Rightarrow \frac{R - R_0}{R_0} = G \cdot F \cdot \varepsilon \Rightarrow R = R_0 \cdot (1 + GF\varepsilon) \quad [7]$$

Dónde R_0 es el valor nominal de la resistencia. Por definición y fabricación, el cambio de resistencia no excede el 2% de su valor nominal.

Esta relación entre el cambio de resistencia de un material y la deformación que experimenta permite que, a partir de la medida de los cambios de resistencia, se puede conocer los esfuerzos aplicados y, en su caso, las magnitudes que provocan dichos esfuerzos. Una resistencia dispuesta de forma que sea sensible a la deformación constituye una galga extensiométrica.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

b) Medidas con galgas extensiométricas.

Las limitaciones que es necesario considerar en la aplicación de este principio de medida son numerosas y conviene conocerlas con detalle, pues de lo contrario es difícil obtener información útil con este método.

En primer lugar, el esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuera del margen elástico de deformaciones. Este margen no excede del 1% de la longitud de la galga y va desde unas $3000\mu\epsilon$ para las semiconductoras a unas $40000\mu\epsilon$ para las metálicas. Las galgas semiconductoras tienen una mayor sensibilidad al esfuerzo, pero el cambio de sus resistencias con el esfuerzo es no lineal.

En segundo lugar, la medida de un esfuerzo sólo será correcta si es transmitido totalmente a la galga. Ello se logra pegando ésta cuidadosamente a la superficie mediante un adhesivo elástico que sea suficientemente estable con el tiempo y la temperatura. Además, la galga debe estar aislada eléctricamente del objeto donde se mide y protegida del ambiente. Se supone también que se encuentra en un estado plano de deformaciones, es decir, que no hay esfuerzos aplicados en la dirección perpendicular a la superficie de la galga.

Para que la resistencia eléctrica de la galga sea apreciable, se disponen varios tramos longitudinales y en diseño se procura que los tramos transversales tengan mayor sección, pues así se reduce la sensibilidad transversal a un valor de solo el 1 ó el 2% de la longitud.

Por otro lado, la temperatura es una fuente de interferencias por varias razones. Afecta a la resistividad del material, y a sus dimensiones del soporte. Como resultado de todo ello, una vez que la galga está dispuesta en la superficie de medida, si hay un cambio de temperatura, antes de aplicar ningún esfuerzo se tendrá ya un cambio de resistencia.

La resistencia de un conductor varía con la temperatura de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_T = R_{T_0} \cdot (1 + \alpha_0 \Delta T) \quad [8]$$

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Donde R_T es la resistencia a la temperatura T (en °C), R_{T_0} es la resistencia a la temperatura de referencia, α_0 es el coeficiente de temperatura y T es el cambio de temperatura desde T_0 . Por tanto, el cambio de resistencia debido a un cambio de temperatura $\Delta T = T - T_0$ es:

$$\Delta R_T = \alpha_0 \cdot R_{T_0} \Delta T \quad [9]$$

El efecto de la temperatura cuando se utiliza galgas extensiométricas se compensa utilizando galgas pasivas, que son galgas iguales a las de medida dispuestas junto a éstas, de forma que experimentan el mismo cambio de temperatura, pero que no están sometidas a esfuerzos mecánicos porque se sitúan transversalmente al esfuerzo.

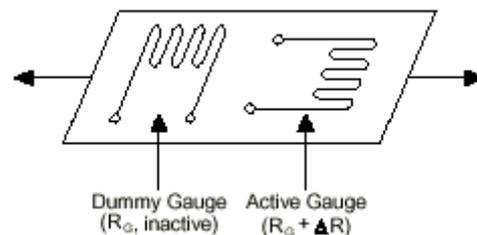


Figura 2- 2 Esquema de galgas extensiométricas

Un factor que puede provocar el calentamiento de la galga es la propia potencia que disipe, cuando se haga circular por ella una corriente eléctrica. En las galgas metálicas, la corriente eléctrica es de unos 25 mA, si el soporte es buen conductor del calor, como el acero, cobre o aluminio. Si es mal conductor, como el plástico o la madera, la corriente máxima es de unos 5mA.

Los materiales que se utilizan para la fabricación de galgas extensiométricas son conductores metálicos (aleaciones de acero especiales, constantan, advance,...) y semiconductores (Si, Ge).

Para realizar medidas de fuerza utilizando galgas extensiométricas, se disponen una o varias galgas en un puente de Wheatstone.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

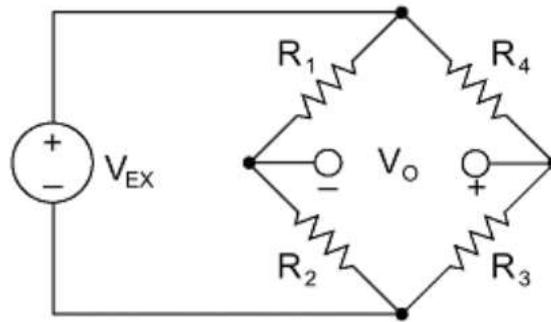


Figura 2. 3 Esquema básico de un Puente de Wheatstone

Este es el esquema básico de un puente de Wheatstone, donde $R_4=R_2=R_3=R$ y $R_1=R+\Delta R_T+\Delta R$. Está alimentado por una fuente de tensión V_{EX} y el valor de lectura es V_{out} .

Sin esfuerzo, $\Delta R=0$, las cuatro resistencias son iguales, por lo tanto la tensión de salida $V_{out}=0$. Cuando se aplica un esfuerzo, cambia la resistencia de la galga extensiométrica en ΔR , de modo que:

$$V_{out} = \frac{E \cdot R}{R + R} - \frac{E \cdot R}{R + (R + \Delta R + \Delta R_T)} = \frac{E}{2} - \frac{E \cdot R}{2 \cdot R + \Delta R + \Delta R_T} = \frac{E \cdot (\Delta R + \Delta R_T)}{4 \cdot R + 2 \Delta R + 2 \cdot \Delta R_T} \quad [10]$$

Siendo ΔR_T el cambio de resistencia debido a la temperatura.

Puesto que ΔR está tanto en el numerador como en el denominador de la expresión, la salida del puente depende de forma no lineal de la fuerza aplicada. Sin embargo, R tiene un valor de varios cientos de ohms, mientras que ΔR es típicamente 0.01 ohm, 1000 veces menor. Por tanto, si $4R \gg 2\Delta R + 2\Delta R_T$, se puede hacer la aproximación:

$$\text{Si } 4R \gg 2\Delta R + 2\Delta R_T \Rightarrow V_{out} \cong \frac{E(\Delta R + \Delta R_T)}{4 \cdot R} \quad [11]$$

$$\text{Y si } \Delta R_T=0 \Rightarrow V_{out} \cong \frac{E(\Delta R)}{4 \cdot R} \quad [12]$$

Con lo que la salida del puente es directamente proporcional a la fuerza aplicada.

La ventaja de utilizar un puente de Wheatstone es que, si las dos resistencias de un lado del puente son galgas extensiométricas, los efectos de la temperatura se pueden eliminar.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

A continuación, se muestra la configuración de un puente de Wheatstone con una galga activa y otra pasiva para compensar los efectos de la temperatura.

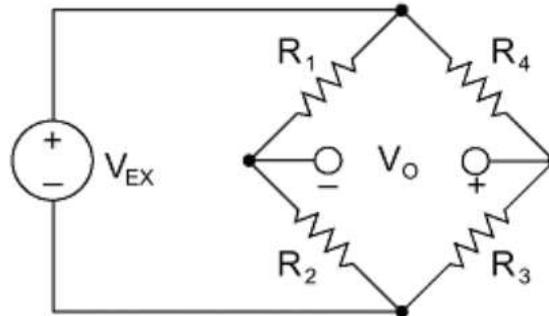


Figura 2. 4 Puente de Wheatstone con Compensatoria de Temperatura

Con $R_4=R_3=R$, $R_1= R+\Delta R_T +\Delta R$ y $R_2= R+\Delta R_T$.

La galga activa se somete a la fuerza aplicada mientras que la galga pasiva se sitúa transversalmente al esfuerzo, de forma que la deformación que sufre es prácticamente nula. La fuerza aplicada solo afectará a la galga activa, haciendo que la salida de tensión sea distinta a cero. Sin embargo, cualquier cambio de temperatura afectará a las dos galgas por igual, de modo que no se producirá un cambio en la tensión de salida del puente por esta causa. La salida por tanto es ahora:

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= \frac{E \cdot R}{R + R} - \frac{E \cdot (R + \Delta R_T)}{(R + \Delta R_T) + (R + \Delta R + \Delta R_T)} = \frac{E}{2} - \frac{E(R + \Delta R_T)}{2 \cdot R + \Delta R + 2\Delta R_T} = \\
 &= \frac{E \cdot (\Delta R)}{4 \cdot R + 2\Delta R + 4 \cdot \Delta R_T} \cong \frac{E(\Delta R)}{4R} \quad [13]
 \end{aligned}$$

Para mejorar la sensibilidad del puente, se puede utilizar dos galgas activas en los brazos de un lado del puente de medida. De forma que: con $R_4=R_3=R$, $R_1= R+\Delta R_T +\Delta R$ y $R_2= R+\Delta R_T-\Delta R$.

Al conectarse las dos galgas activas en un mismo lado del puente, los efectos de la temperatura se eliminan. Si una de las galgas se somete a esfuerzos de tensión (su resistencia aumenta con la carga), el voltaje de salida para una carga dada es el doble del que se obtendría utilizando una sola galga activa.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= \frac{E \cdot R}{R + R} - \frac{E \cdot (R - \Delta R + \Delta R_T)}{(R + \Delta R + \Delta R_T) + (R - \Delta R + \Delta R_T)} = \frac{E}{2} - \frac{E(R - \Delta R + \Delta R_T)}{2 \cdot R + 2\Delta R_T} = \\
 &= \frac{E \cdot (\Delta R)}{2 \cdot R + 2 \cdot \Delta R_T} \cong \frac{E(\Delta R)}{2R}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

La sensibilidad del puente mejora aún más si se utiliza cuatro galgas activas:

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= \frac{E \cdot (R + \Delta R + \Delta R_T)}{(R + \Delta R + \Delta R_T) + (R - \Delta R + \Delta R_T)} - \frac{E \cdot (R - \Delta R + \Delta R_T)}{(R + \Delta R + \Delta R_T) + (R - \Delta R + \Delta R_T)} = \frac{E(2\Delta R)}{2R + 2\Delta R_T} = \\
 &= \frac{E \cdot (\Delta R)}{R + \Delta R_T} \cong \frac{E(\Delta R)}{R}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Para obtener resultados exactos y precisos con galgas extensiométricas, éstas deben de utilizarse correctamente, deben de estar correctamente alineadas con la fuerza, la célula debe proporcionar igual tensión y compresión a las galgas de los brazos opuestos del puente, la galga debe estar adecuadamente adherida a la célula, etc.

La especificación más importante de una célula de carga es la salida referida a la fuente de alimentación (*Output*). Se expresa en mV/V y es el voltaje de salida diferencial del puente que produce la carga de fondo de escala por cada voltio de la fuente de alimentación. Utilizando el dato *Output*, se calcula la Sensibilidad y la tensión de salida (*Vout*) de la célula de carga como:

$$\text{Sensibilidad} = \text{Output} \cdot \text{Excitación} / \text{Carga (FS)}$$

$$\text{Vout} = \text{Sensibilidad (V/carga)} \cdot \text{carga} \tag{16}$$

c) Procedimiento de adhesión de las galgas extensiométricas sobre las probetas.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, para obtener resultados exactos y precisos con galgas extensiométricas la adhesión de la galga a la célula ha de ser lo más precisa posible, y ésta debe estar alineada con la fuerza ejercida.

La célula con la que se está trabajando, como se ha mencionado, está torneada con máquinas de alta precisión; aun así, la base donde se pegarán las bandas no está lo suficientemente pulida como para que la banda quede perfectamente adherida. Para ello, con una lima de metal, limaremos la superficie de la célula donde pegaremos la banda. Una vez limado, con una lija de madera de grano medio/fino, lijaremos la superficie dejando totalmente

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

pulida la célula. En las siguientes imágenes se muestra la superficie tal cual la entrega el suministrador, y como queda una vez repasada.



Figura 2- 5 Superficie de Célula sin Lijar



Figura 2- 6 Superficie de Célula Lijada

En la figura 2-3, se puede ver como la superficie aún tiene pequeños filamentos metálicos que no dejarán adherir perfectamente la banda con la célula. En la siguiente figura, se aprecia que una vez lijada y repasada, esos filamentos son casi despreciables por el tacto del dedo. Aquí ya se pueden adherir correctamente las bandas.

Una vez lijada la superficie de la célula donde se adherirá la galga, hay que limpiarla perfectamente eliminando posibles virutas o grasa. Es importante utilizar algún tipo de producto desengrasante como es la Acetona, ya que a la hora de torneear las células, utilizan lubricantes especiales para evitar el calentamiento de las cuchillas con la propia célula.

Tras limpiar la célula, estamos preparados para empezar a pegar bandas a la célula.

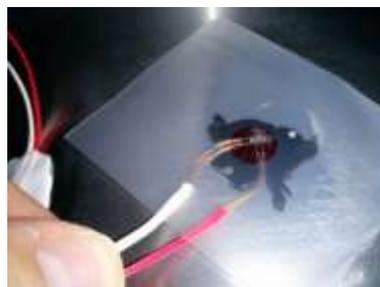


Figura 2- 7 Adhesión de galga

Como se puede ver en la Figura 2-5, adherimos la banda alineada a la dirección de la fuerza. El adhesivo utilizado en la adhesión de las bandas es muy resistente y no conviene el contacto con la piel. Por ello se usa este protector que proporciona el propio suministrador de las bandas. Apretamos unos instantes con el dedo sobre la banda y quitamos el protector.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Una vez seco el adhesivo, protegemos la banda con una masilla contra la humedad evitando su corrosión.

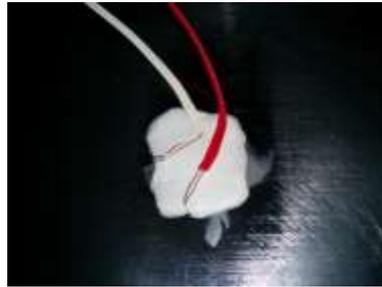


Figura 2- 8 Protección contra humedad

Colocada y protegida la banda, ya podemos hacer las conexiones en puente de Wheatstone.

Para conseguir unos resultados que cumplan los requisitos mínimos, estamos poniendo 16 galgas electromagnéticas, es decir, ocho galgas electromagnéticas en dirección a la fuerza y ocho bandas de compensación. Como cada banda ya tiene unida la galga de medida con la de compensación, se simplifica en 8 bandas.

Ahora mismo, en este tipo de célula en la que estamos trabajando, se está llegando a unas sensibilidades menores al micro strain.

En el caso de la barra corrugada, el primer paso es rebajar la corruga con la ayuda de una rotaflex, una vez rebajado la corruga, con la ayuda de lijas de diferentes grosores, se va puliendo la superficie para conseguir una adhesión perfecta entre la barra y los sensores.



Figura 2- 9 Rebaje de Corruca en la Barra

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Como se aprecia en la figura, se rebaja la corruga de tal forma que quede una zona lo más pulida posible, para que la adhesión de los sensores sea lo mejor posible.

2.3. Sensores basados en fibra óptica

a) La fibra Óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos. Se trata de un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían ondas o pulsos de luz que representan los datos a transmitir. La fibra óptica es capaz de guiar una potencia óptica (lumínica) normalmente introducida por un láser o por un LED (*Light-Emitting Diode*) [].

La fibra óptica está constituida por tres capas: núcleo, cubierta y recubrimiento. El núcleo central está hecho de sílice (SiO_2) al que se le añaden pequeñas cantidades de dopantes (p.ej. germanio). El núcleo tiene un alto índice de refracción (cociente entre la velocidad de la luz en el vacío, c , y la velocidad de la luz en ese material, v) y un diámetro de $9 \mu\text{m}$. En cambio, la cubierta (de un material similar) presenta un índice de refracción algo menor para satisfacer la *Ley de Snell*, limitando de este modo la propagación de la luz sólo a lo largo del núcleo. La cubierta tiene típicamente un diámetro de $125 \mu\text{m}$. La última capa exterior de la fibra óptica, llamada recubrimiento (hecha de acrilato) da a la fibra resistencia mecánica y la protege frente a posibles daños y humedades. Puede presentar un diámetro de unos $250 \mu\text{m}$.

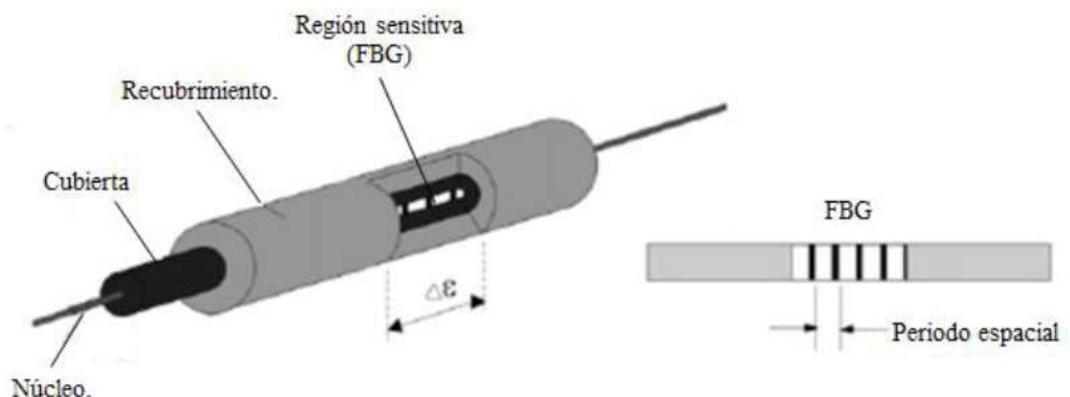


Figura 2- 10 Estructura básica sensor Óptico

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

La luz viaja a lo largo de la longitud de la fibra quedando atrapada en el interior del núcleo. Este modo de propagación (conocido como reflexión interna total) de la luz cumple la *Ley de Refracción de Snell* a partir de:

- Las relaciones entre el ángulo de incidencia de la luz y el ángulo crítico (ángulo de incidencia para el que el ángulo de refracción alcanza 90°).
- Las relaciones entre los coeficientes de refracción del núcleo y cubierta.

Los sensores de fibra óptica se pueden clasificar en función de varios criterios. Sin embargo, todos ellos basan su funcionamiento en el estudio de las propiedades de la luz que viaja a través de ella.

Los distintos tipos de sensores ópticos se exponen a continuación clasificados según distintos criterios:

i. El parámetro a medir:

Dependiendo de las propiedades de la luz que se desee modular, los sensores se pueden clasificar como:

- *Moduladores de intensidad.* Es el tipo de sensor que mide cualquier parámetro que pueda producir pérdidas de la potencia óptica de la luz guiada. Los principales fenómenos que producen atenuación de la luz son microcurvaturas, temperatura, radiación ionizada... Utilizando este tipo de sensores se puede llegar a medir deformación, temperatura, curvatura o humedad.
- *Sensores interferométricos.* El cambio de fase es monitorizado mediante el uso de este tipo de sensores. Son los sensores ópticos más precisos y sensibles. Los principales parámetros que pueden medir estos sensores son: deformaciones, temperaturas, vibraciones y rotaciones. Los sensores interferométricos más usuales son los llamados sensores *Fabry-Perot*.
- *Sensores espectrométricos.* Este tipo de sensores controlan los cambios en la longitud de onda de la luz. Los sensores espectrométricos más usuales son los *Bragg-Grating*. Su sensibilidad es menor que la de los sensores interferométricos pero su configuración, instalación y procesado de datos es mucho más simple.
- *Sensores polarimétricos.* Sensores basados en la polarización de la luz guiada. La sensibilidad de estos sensores es menor que la de los sensores interferométricos

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

debido al ruido intrínseco del sistema, pero en la actualidad, gracias a los avances en el sector se está incrementando su sensibilidad. Son los que menor uso y sensibilidad presentan.

- *Moduladores de la dispersión.* Son los sensores que miden las variaciones de la dispersión de la luz provocadas por pequeñas imperfecciones en el material. En este grupo se engloban los sensores distribuidos basados en fenómenos de la dispersión de *Rayleigh*, *Brillouin* o *Raman*. Su uso es muy apropiado para grandes longitudes de monitorización donde la precisión no supone un factor importante. Son aptos para medir deformaciones y temperaturas. Ejemplos típicos de aplicaciones con este tipo de sensores son la monitorización de tuberías, cables de puentes colgantes, o vigas de gran luz.

ii. Su aplicación:

- *Localizados o puntuales.* Se trata de sensores preparados para realizar medidas puntuales. La muestra una sección longitudinal de un elemento de hormigón sobre el que aparecen 3 fisuras y está instrumentado con tres sensores de deformación puntuales localizados. Mientras que los sensores instalados próximos a las fisuras miden poca deformación, el sensor instalado justo sobre la fisura central proporciona un valor de deformación elevado. Para la aplicación de estos sensores, hay que conocer previamente los puntos de estudio. Esto puede ser su inconveniente en ciertos casos.

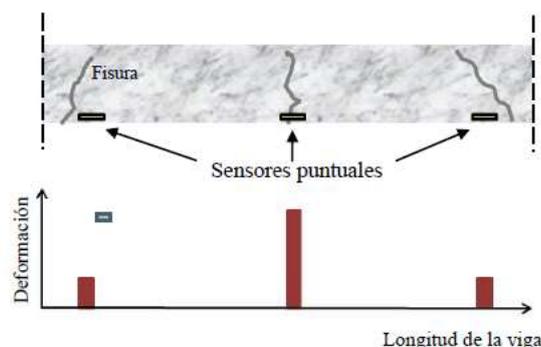


Figura 2. 11 Sensores Localizados o puntuales

- *Distribuidos.* Se trata de sensores preparados para realizar una medida continua a lo largo de una fibra y por tanto, obtener una lectura continua de la medida. La principal

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

ventaja de su aplicación es que con un solo cable de fibra óptica se puede medir en cualquier punto usando una única fuente de luz y un sistema de procesado. No obstante, la precisión y la sensibilidad son típicamente mucho menores que la de los localizados.

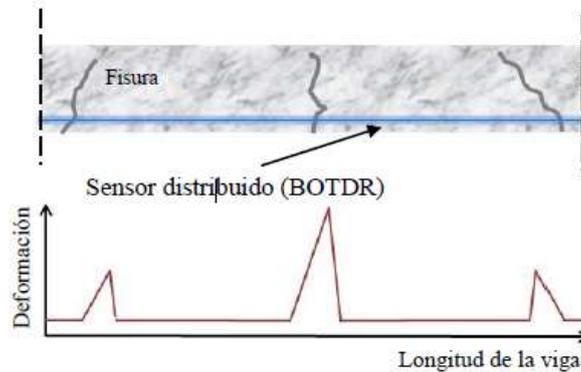


Figura 2.12 Sensores Distribuidos

En la figura se muestra la misma sección de viga de hormigón anterior instrumentada con un sensor distribuido continuo. El resultado es una ley de deformaciones continua. A partir del BOTDR (*Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*) el sensor detecta la fisuración que se produce sobre el elemento estructural.

- *Multiplicados o multiplexed o cuasi-distribuidos.* Su funcionamiento es parecido al de los sensores distribuidos. Normalmente se construyen mediante una combinación de varios sensores individuales (Ansari 2007, Davis et al. 1997, Maaskant et al. 1997). Los sensores ópticos multiplicados más empleados son los sensores Bragg-Grating empleados en gran parte de este trabajo.

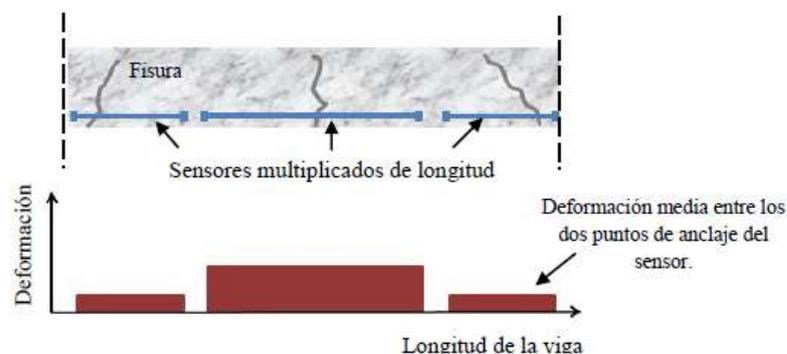


Figura 2.13 Sensores Multiplicados o cuasi-distribuidos

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

En la Figura 2.13 se muestra la misma viga, pero esta vez instrumentada con sensores multiplicados de longitud. En este caso, el sensor proporciona el valor medio de las deformaciones entre los puntos de anclaje del sensor.

iii. Sensores intrínsecos y extrínsecos:

- *Sensores intrínsecos.* La medida se realiza sobre la fibra óptica, y las variaciones se producen sobre las propiedades de la fibra óptica. Por tanto, la fibra es empleada como medio de transporte de la luz y como medio sensitivo.
- *Sensores extrínsecos.* La fibra óptica es usada puramente como medio de transporte desde la fuente a la parte sensitiva. Por lo tanto la luz no sufre ningún cambio a lo largo de la fibra óptica.

En este proyecto, se van a estudiar los sensores de fibra óptica llamados FBG (*Fiber Bragg Grating*) y los sensores distribuidos SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*). Como se dijo anteriormente, el objetivo del proyecto, es la medición de deformaciones en la célula de carga.

b) Redes de Bragg

Los sensores basados en FBG (*Fiber Bragg Grating*) conforman la tecnología más ampliamente estudiada en el mundo del sensado óptico durante las últimas dos décadas [14]. Desde que la formación de redes de Bragg fue presentada por primera vez en 1978 [15], numerosos métodos efectivos de fabricación han sido desarrollados. Los FBGs han sido utilizados tanto como elementos de sensado como en dispositivos de comunicaciones ópticas como filtros *Add/Drop*, compensadores de dispersión, en amplificadores, en láseres de fibra, etc. Muchos estudios intensivos han sido desarrollados en esta tecnología, algunos de los cuales han alcanzado la fase de comercialización.

Una red de difracción es un dispositivo óptico que se crea al alterar, de forma periódica o cuasi- periódica, el índice de refracción del núcleo de una fibra óptica. Estas perturbaciones del índice de refracción son producidas por la exposición de la fibra óptica a un patrón de interferencia óptica intenso. La luz que se propaga por el interior de la fibra óptica se encuentra con múltiples discontinuidades en el medio que provocan que parte de la luz incidente sea transmitida y otra parte sea reflejada debido a las sucesivas reflexiones.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

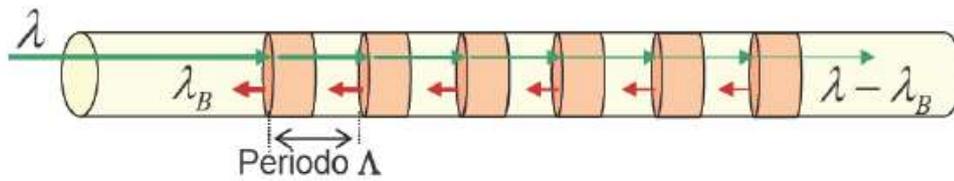


Figura 2- 14 Red de Bragg

Una FBG es un tipo de reflector constituido en un breve segmento de fibra óptica capaz de reflejar diferentes longitudes de onda de la luz. Esto se logra inscribiendo en su núcleo una red de difracción de Bragg.

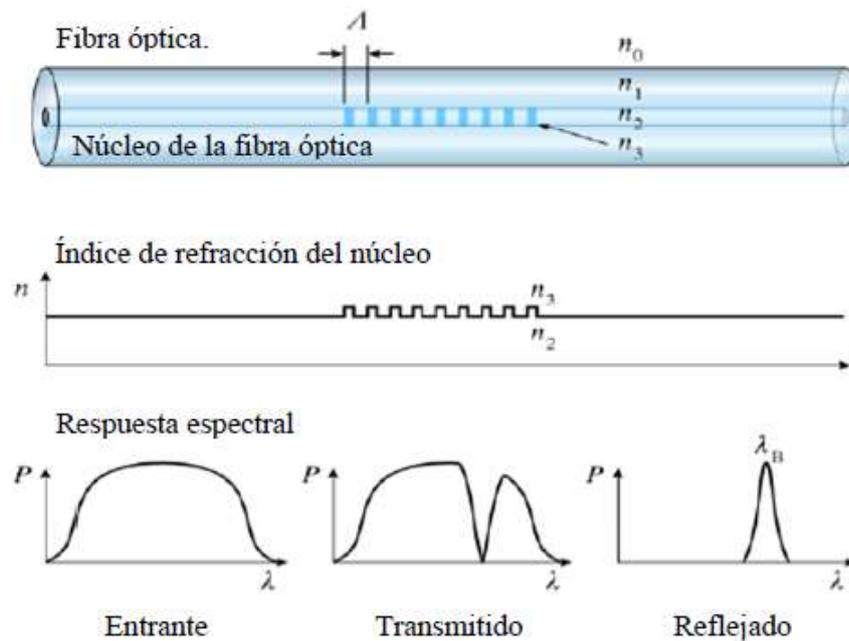


Figura 2- 15 Comportamiento espectral de un FBG

El premio nobel Sir William Lawrence Bragg estableció la ley de Bragg en 1915 [16], en la cual se puede demostrar que en una red de difracción de Bragg la longitud de onda del máximo de reflectividad, o mínimo de transmisividad (Longitud de onda de Bragg, λ_B), viene determinada por la ecuación:

$$\lambda_B = 2 * n_{eff} * \Lambda \quad [17]$$

Donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo y Λ es el periodo espacial de las perturbaciones inducidas en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Hay distintas formas de modular el índice del núcleo de la fibra: tipo I, tipo II, tipo In, composición química, con láser femtosegundo en el infrarrojo (fs-IR), etc. [17]. Típicamente el grabado de la red se consigue fotoimprimiendo un patrón de interferencia en el núcleo de fibra óptica fotosensible. Cuando un núcleo dopado con germanio es expuesto a una alta intensidad de rayos UV su índice de refracción aumenta. El germanio es utilizado para incrementar el índice de refracción del núcleo de sílice de una fibra óptica, por lo que solo está presente en el núcleo y no en la cubierta de la fibra óptica.

Si se producen cambios en la fibra (deformación, temperatura o presión) la longitud de la onda reflejada cambia su valor. Cuando el FBG es estirado o comprimido, el periodo Λ cambia y el índice de refracción efectivo n_{eff} del FBG también cambia debido al efecto fotoelástico. Esto produce un strain o deformación de un $d\varepsilon$ conlleva un desplazamiento en la longitud de onda reflejada de un $d\lambda_B$:

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{d\varepsilon} = \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{d\varepsilon} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} \quad [18]$$

Usando las relaciones entre el cambio del índice efectivo, coeficiente fotoelástico y el strain, además de la relación entre la deformación axial y el periodo del grating, el cambio relativo en la longitud de onda reflejada debido a la deformación axial relativa (strain) viene dado por:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_0} = (1 - p_e)\varepsilon \quad [19]$$

Cuando la zona de la fibra óptica donde está grabada la red de Bragg es comprimida por una presión transversal, el cambio inducido en la longitud de onda de Bragg como respuesta al cambio de presión viene dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial P} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial P} \right] \Delta P \quad [20]$$

Mientras que la dependencia con la temperatura sigue la siguiente ecuación.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right] \Delta T = (\alpha - \xi)\Delta T \quad [21]$$

Donde α es el coeficiente de expansión térmica y ξ es el coeficiente termo-óptico.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

El efecto total en el desplazamiento de la longitud de onda reflejada, indica que la fibra sufre cambios en más de uno de estos parámetros (strain, temperatura, presión), es la superposición de cada uno de los cambios, por lo que es necesario el uso de técnicas de discriminación para determinar a qué parámetro es debida la variación sufrida en la longitud de onda reflejada.

Existen diferentes tipos de redes de Bragg [18] en función de cómo sea la modulación de índice de refracción. En un FBG o red de periodo corto se acopla el modo fundamental de propagación con el modo de propagación hacia atrás (Figura 2.16.a). En una red de periodo largo LPG, debido a que su periodo toma valores entre 100 μm y 1 mm se produce un acoplo entre el modo fundamental de propagación y los modos de cubierta (Figura 2.16.b).

Una red linealmente chirpeada CFG tiene un espectro reflejado más ancho y cada componente de longitud de onda es reflejada en diferentes posiciones, lo que deriva en una diferencia temporal entre cada onda reflejada (Figura 2.16.c). En cambio, en una red con modulación de índice de núcleo inclinada respecto al eje axial TFG (*Tilted Fiber grating*) se produce un acoplo entre el modo de propagación fundamental, el modo de propagación hacia atrás y los modos de cubierta (Figura 2.11.d). Por último, una red muestreada SFG (*Sampled fiber grating*) puede reflejar varios componentes de onda con idéntico espaciado de longitud de onda (Figura 2.16.e).

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

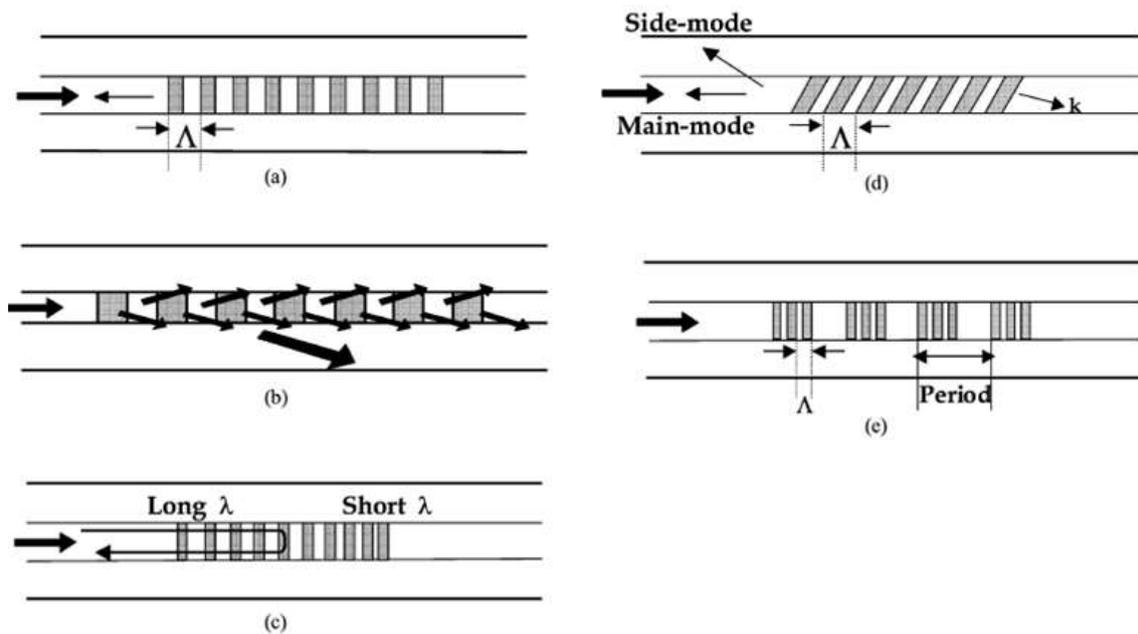


Figura 2- 16 Tipos de redes de Bragg: (a) FBG, (b) LPG, (c) CFG, (d) TFG, (e) SFG.

Un sistema de monitorización óptico basado en FBGs está compuesto por los siguientes elementos:

- Una red, conjunto de sensores y sus conexiones. Son los elementos encargados de medir los parámetros relevantes de la estructura monitorizada. Se instalan en los puntos de la estructura donde se desea conocer información.
- Un sistema de procesado de datos. Es el sistema de transmitir, adquirir y almacenar los mismos. Suele ser un PC.
- Una fuente óptica. Es la encargada de transmitir las ondas de luz. Dependiendo de la fibra óptica utilizada, se empleará como fuente óptica de luz:
 - ✓ Láser: Fuente suministradora de ondas de banda estrecha (luz formada por sólo una longitud de onda específica –luz monocromática-), para fibras ópticas que sólo propagan un modo de onda (fibras tipo monomodo).
 - ✓ LED (*Light-Emitting Diode*): Fuente suministradora de ondas de banda ancha (Luz formada por diferentes longitudes de onda –Luz policromática o luz blanca-), para fibras ópticas tipo multimodo.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

- El circulador permite el paso de la luz en un sentido, desde la fuente óptica hacia las estrellas pasivas. A su vez, impide que el espectro de luz reflejado llegue de nuevo a la fuente óptica y sea dirigido hacia el analizador de espectros ópticos (OSA, *Optical Spectrum Analyzer*).
- OSA (Optical Spectrum Analyzer). Es el encargado de la obtención del espectro de luz y sus variaciones en el tiempo.

Actualmente y debido a los avances que en los últimos años ha gozado el campo del sensado óptico, la fuente óptica de luz, el circulador y el OSA se engloban en un único elemento que recibe el nombre de Interrogador. Este elemento es muy cómodo, fácil de transportar y de reducido tamaño. Además, es muy común el empleo de estrellas pasivas. Las estrellas pasivas son elementos que acoplan distintas FBGs. Estos elementos tienen un número determinado de canales de entrada y una única salida. Las estrellas pasivas se emplean en aquellas FBGs que no pueden conectarse en serie unas con otras.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

c) Brillouin

Antes de comenzar el análisis de los sensores distribuidos basados en la dispersión de Brillouin (*Stimulated Brillouin Scattering, SBS*), se clasifican los efectos no lineales que ocurren en la fibra óptica cuando se inyecta una potencia superior a la potencia umbral. Esta potencia inyectada se denomina *señal de bombeo* o *pump*.

Este hecho hace que una pequeña parte de la luz inyectada se refleje en cada punto de la fibra, lo que se conoce con el nombre de *back-scattering* o retro-dispersión y supone una dispersión de la luz en sentido contrario a la de la potencia inyectada.

Este *back-scattering* de la luz presenta tres componentes que pueden ser identificadas y a través del estudio de sus variaciones, puede obtenerse gran cantidad de información:

- ✓ Scattering Rayleigh. Este scattering se debe a imperfecciones macroscópicas. El scattering reflejado se detecta a la misma longitud de onda y frecuencia que la luz emitida.
- ✓ Scattering Brillouin. Es un scattering de menor intensidad que el anterior. Este fenómeno sirve para la medición de pequeñas fluctuaciones a escala microscópica como variaciones de deformación y temperatura. Este scattering se encuentra desplazado en frecuencia un valor aproximado de 11.1 GHz.
- ✓ Scattering Raman. Se trata de un fenómeno mucho menos probable y de mucha menor intensidad. Es capaz de detectar variaciones en la vibración de las moléculas del material, por lo que su uso se extiende a la identificación de materiales. Este scattering se encuentra desplazado en frecuencia un valor aproximado de 13 THz.

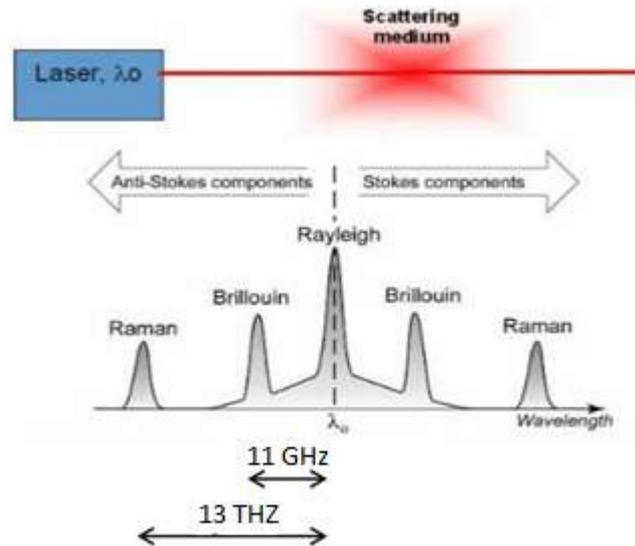


Figura 2- 17 Back-scattering

Los sensores distribuidos basados en la dispersión de Brillouin conforman un sensor continuo a través de la fibra. Esto significa que a lo largo del cable óptico empleado en la monitorización se dispondrá de tantos puntos de medida como permita la tecnología utilizada.

Debido a la poca potencia del *back-scattering*, existen métodos que amplifican la señal reflejada. Esto se consigue a partir de la inyección desde el extremo opuesto de la fibra de otra señal, justo con la misma frecuencia (frecuencia Brillouin) y es por este motivo, por la que esta técnica recibe el nombre de “estimulada”.

En principio, se podría pensar que el SBS es un efecto perjudicial para transmitir por la fibra óptica y en efecto, en muchas aplicaciones como en comunicaciones es un efecto a mitigar para mejorar las prestaciones de la misma. Sin embargo, es posible estimar la variación del SBS ante ciertos estímulos y calibrar esta variación para correlacionarla con algún parámetro estructural como son la deformación y la temperatura.

Esta correlación se realiza a partir de los desplazamientos de la frecuencia de Brillouin. Dado que ésta depende del índice de refracción y de la velocidad de las ondas acústicas en el interior de la fibra, ésta varía, siempre que estos parámetros se vean afectados y por tanto, esta técnica puede ser usada para obtener la temperatura y la deformación a lo largo de la fibra óptica.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Para la obtención de las medidas se debe monitorizar la zona de ganancia antes mencionada, barriendo en sentido contra propagante a la señal *pump* inyectada con otra señal que abarque un ancho de banda suficiente. Esto se obtiene inyectando una señal separada del *pump* original unos 11 GHz. De esta forma, se obtiene una señal (Stokes) que corresponde con un pico separado 11 GHz de la señal *pump* original.

Este pico separado 11 GHz de la señal inyectada es el que experimenta variaciones en su frecuencia, llamada Frecuencia de Brillouin, de forma que frente a aumentos de temperatura la frecuencia de Brillouin también aumenta y viceversa. De una forma similar, la frecuencia de Brillouin aumenta en caso de tracciones en la fibra y viceversa.

Otro aspecto interesante que ofrece el sensado distribuido de Brillouin es el hecho de conocer en qué punto se sitúa la variación de frecuencia de Brillouin, y por tanto la variación del parámetro estructural estudiado. De esta forma se puede conocer la posición exacta donde se sitúa la variación.

Los sensores distribuidos basados en el Scattering de Brillouin son muy apropiados para muchas aplicaciones, sin embargo, su naturaleza y principio de funcionamiento los hace inviables para otras. En general, el sensado distribuido presenta las siguientes particularidades:

- El sensado distribuido proporciona valores del parámetro a medir, ya sean deformaciones o temperaturas a lo largo de toda la longitud de la fibra óptica. Esto representa una clara ventaja respecto a los FBGs en determinados casos.
- La fibra óptica necesaria para llevar a cabo las mediciones es fibra de comunicación estándar, sin necesidad de realizar ningún tratamiento. En el caso de las FBGs es necesario grabar sobre el núcleo de la fibra óptica una red de difracción. En este aspecto, el sensado distribuido presenta una clara ventaja económica con respecto a las otras técnicas.
- Esta tecnología tiene muy bajas pérdidas por lo que su rendimiento máximo se alcanza en monitorizaciones de grandes distancias, del orden de kilómetros. De este modo, los sensores basados en SBS son particularmente atractivos para aplicaciones en las que se requieran grandes longitudes.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

d) Procedimiento de adhesión del sensor óptico sobre las probetas.

Al igual que se explicó en la adhesión de las galgas en cada una de las probetas, en este punto se explicara la adhesión de los gratings (FBGs) sobre las probetas que se quieren ensayar.

Los sensores que se van a colocar en este ensayo, son prototipos realizados en el **Laboratorio de Investigación del Grupo de Ingeniería Fotónica (GIF) de la Universidad de Cantabria** por parte del personal del grupo. Con ello se quiere dar a entender que no son sensores comerciales.

Las protecciones que deben tener estos sensores tienen que permitir la perfecta adhesión a las probetas que se desean ensayar. En el caso de los gratings con los que se trabaja en este proyecto no contienen estas protecciones. Por lo tanto, la fibra desnuda donde está grabado el sensor no solapa al cien por cien en la probeta, ya que el hilo de fibra óptica es circular, y la superficie de la probeta es dentro de lo posible, horizontal, tal y como se muestra en la Figura 2.13.

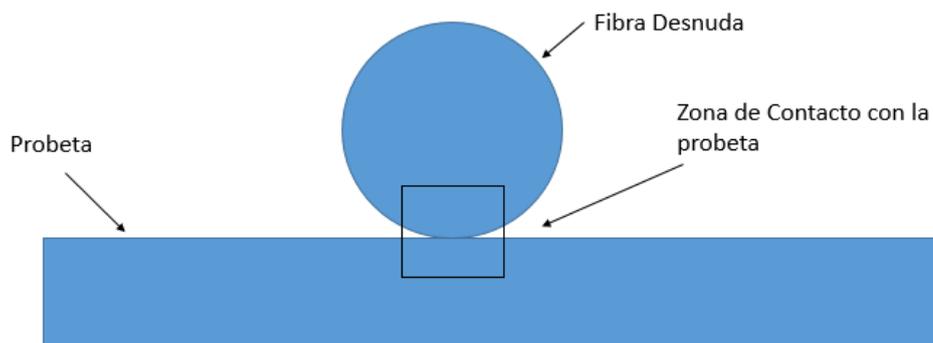


Figura 2- 18 Adhesión de la fibra desnuda a la probeta

La zona de contacto de la fibra donde está grabado el sensor, quizá no esté lo suficientemente adherida a la probeta, lo que a la hora de realizar las medidas es posible que propicie algún problema. En el caso de los sensores comerciales, este problema está subsanado, ya que contienen los soportes y materiales necesarios para que la parte de la fibra donde está grabado la FBG haga el suficiente contacto con la probeta y la medida sea limpia y precisa.

A este problema se añade el posible deslizamiento que haya entre la fibra y la probeta. En el caso de la célula, es posible que no suceda, ya que las elongaciones del material no serán tan abruptas, pero en el caso de la barra corrugada, las deformaciones de ésta van a ser

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

mayores, y por tanto el deslizamiento de la fibra sobre el plano horizontal será mayor. También el adhesivo utilizado en el caso mencionado quizá no sea lo suficientemente flexible para que permita el deslizamiento natural del grating, produciendo la rotura o el despegado del mismo sobre la probeta.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

3. Experimental

3.1 Contexto de trabajo típico.

Este proyecto se puede dividir en dos partes, la primera, el grabado y pegado de los *gratings*, la cual ha sido ejecutada en el **Laboratorio de Investigación del Grupo de Ingeniería Fotónica (GIF) de la Universidad de Cantabria** y la segunda parte que ha sido el pegado de galgas y las medidas experimentales, las cuales se han llevado a cabo en **el Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos**, con la colaboración del personal de **GiaDe**.

Hay que tener en cuenta que en este proyecto se pretende hacer una comparativa entre el sensado óptico y el tradicional de galgas. Esto quiere decir que, por ejemplo, los *gratings* utilizados no son comerciales, sino que están grabados en fibra desnuda y adheridos a la barra sin la protección propia de un sensor comercial. Las protecciones típicas de este tipo de sensores tampoco se han colocado, ya que estos son solo prototipos y las medidas realizadas han sido hechas en laboratorios especializados en estos ensayos.

3.2 Medidas experimentales

a) *Setup* de montaje de la Célula de Carga.

Como se ha comentado en puntos anteriores, tanto el grabado de los *gratings* y la adhesión de los mismos en las diferentes probetas de ensayo, ha sido realizada en las instalaciones del grupo de Fotónica de la Universidad de Cantabria. El pegado de las galgas extensiométricas propias de la instrumentación clásica, ha sido realizado en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria.

En el caso de la célula de carga, para tener una comparativa lo más real posible, se decidió hacer la instalación de las dos tecnológicas de medida en la misma probeta, lo que supone tener una célula de carga con 16 sensores, 8 galgas extensiométricas y 8 *gratings* ópticos.

En un primer lugar, se adhirieron las galgas extensiométricas haciéndose las conexiones a *Puente Completo*. El esquema básico de Puente Completo de Wheatstone que se realizó en la célula de carga es como el que se muestra en la figura 3-1:

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

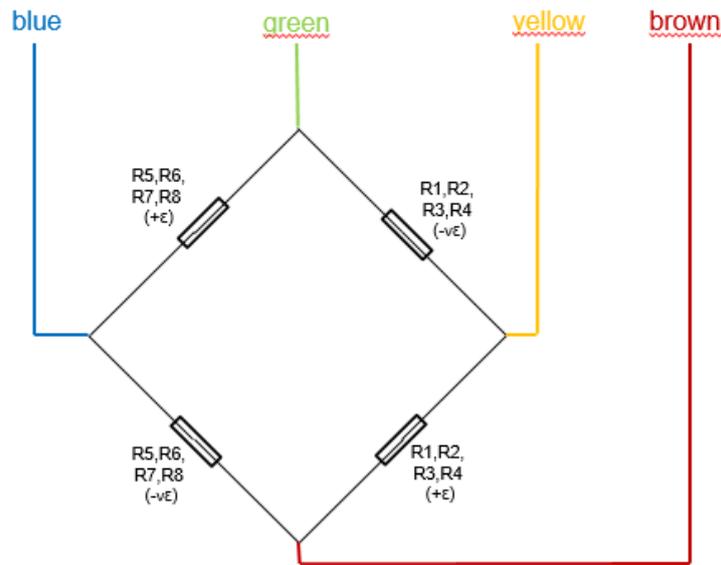


Figura 3- 1 Puente Completo de Wheatstone en Célula de Carga

El equipo de Adquisición de Datos que se ha utilizado para la recogida de datos en el sistema de sensado tradicional de galgas es de la empresa **National Instrument**.

La tarjeta de Adquisición de Datos de National Instrument es la **NI 9237** [19], la cual requiere una configuración específica para la configuración a Puente Completo que utilizan los sensores de esta probeta:

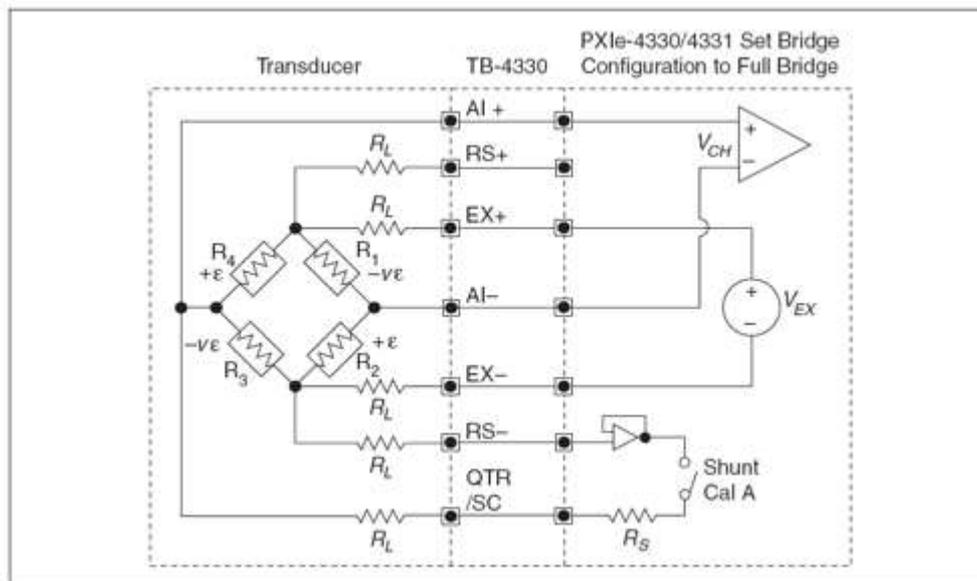


Figura 3- 2 Configuración de Puente Completo NI-9237

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Como se puede apreciar en la Figura 3-2, la tarjeta de National Instrument NI-9237 que se usa para realizar estas medias, contienen en su interior un conjunto de filtros, amplificadores, etc., los cuales acondicionan la señal para que sea lo más precisa posible.

El código de colores seleccionado para hacer la configuración de Puente Completo del equipo sería:

AI+	→	blue
QTR/SC	→	blue
RS+	→	Green
EX+	→	Green
Ex-	→	Red
RS-	→	Red
AI-	→	Yellow

Figura 3- 3 Conexionado Puente Completo Célula de Carga N 9237

Una vez hechas las conexiones en la célula y añadida una manguera de cable de datos para poder trabajar más cómodamente, se puede realizar las conexiones al adaptador de la tarjeta de Adquisición de Datos de **NI 9237** y hacer la instalación al chasis **NI cDAQ™-9188** [20].

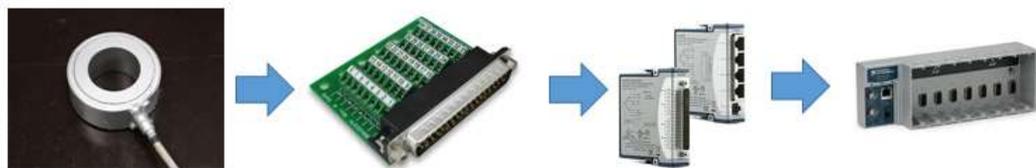


Figura 3- 4 Setup de montaje equipos de NI

El equipo para poder ensayar las probetas ha sido un Pórtico de Carga Unidireccional capaz de llegar hasta los 600KN, lo que equivale a 60 toneladas, a compresión. Este equipo

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

consta de un gato hidráulico que mediante un cuadro de mandos el operario deja la carga a la establecida por parte del ingeniero. Además, la carga introducida al gato hidráulico es medida por una *Célula de Presión* alimentada por una fuente de tensión siendo registrado los datos mediante la tarjeta de Adquisición **NI 9205** [21].



Figura 3- 6 Pórtico de ensayo con Grupo Hidráulico



Figura 3- 5 Célula de Presión de 400bares

Tras hacer las conexiones y configuraciones necesarias en los equipos de *National Instrument*, se realiza el **V.I.** de forma que se registre los datos de los sensores. En este caso en concreto los datos mostrados y registrados en tiempo real por este programa son la fuerza ejercida por el gato hidráulico y la deformación de las probetas.

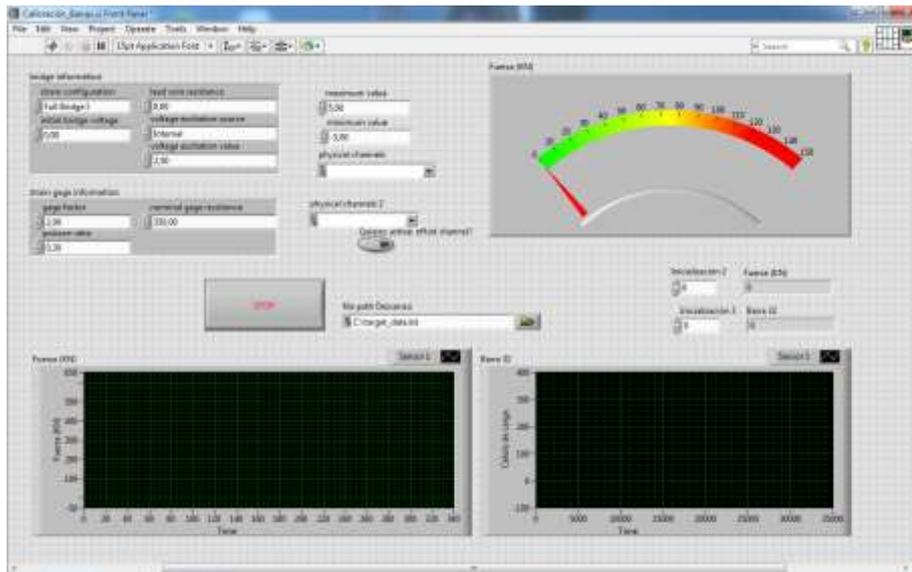


Figura 3- 7 V.I. LabView Registro de datos de la célula

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

El montaje de los *gratings* ópticos fue llevado por el personal del Laboratorio de Investigación del Grupo de Ingeniería Fotónica (GIF) de la Universidad de Cantabria. El primer paso del montaje de este grupo de sensores una vez pegado los *gratings* a la célula, fue numerar los mismos para tener ordenados en todo momento cada uno de ellos y fusionar a cada fibra un conector.



Figura 3- 8 Pegado de Gratings en Célula

Cada uno de los 8 sensores está en fibras diferentes y por tanto en canales diferentes, por ello se decide poner acopladores comerciales 2 a 1 para utilizar los 4 canales que permite la unidad interrogadora. Cada extremo de los acopladores tiene conectores de tipo APC (*Angled Physical Contact*) fusionados, por lo que fue necesario una transición hembra-hembra.

La fibra utilizada en el proceso de montaje de este ensayo, es fibra estándar monomodo de telecomunicaciones G-652.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

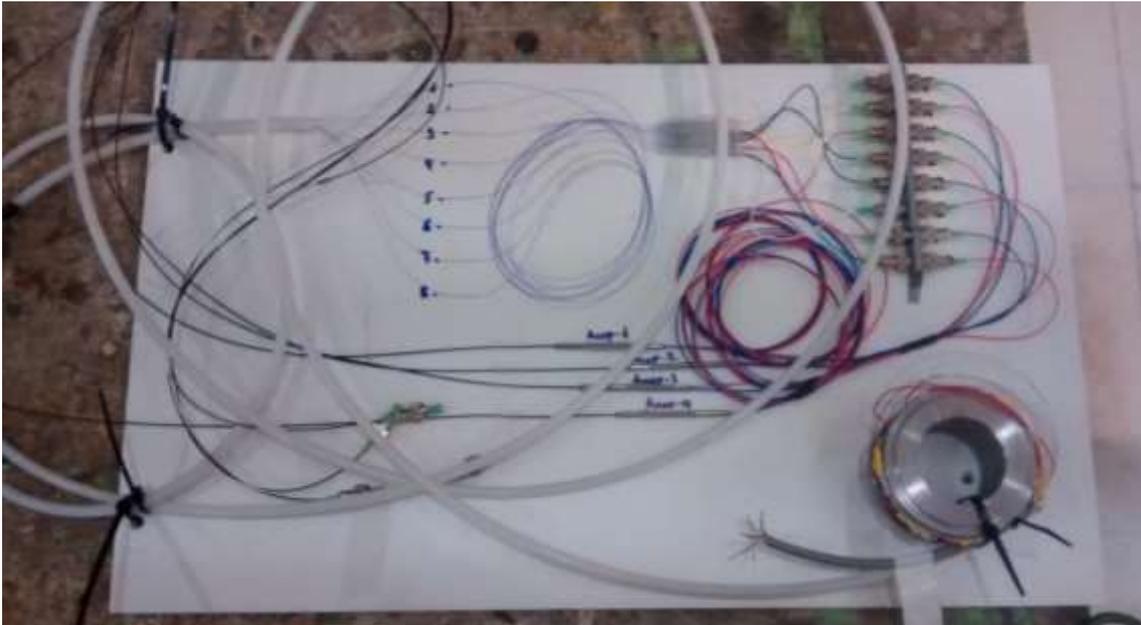


Figura 3- 9 Setup óptico: Célula de carga

Hecho el montaje, solo es necesario hacer las conexiones a la unidad móvil de interrogación a través de los 4 canales. Previamente se limpian los conectores con alcohol y un paño limpio eliminando posibles motas de polvo que puedan dañar la señal.

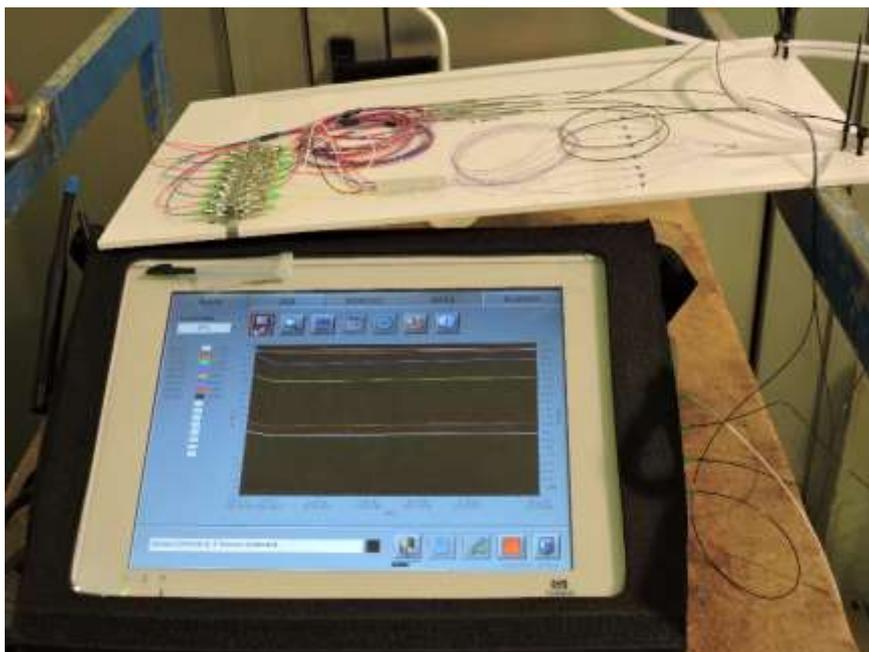


Figura 3- 10 Setup de montaje: Unidad de Interrogación y canales conectados



Figura 3- 11 Célula de Carga Instalada en el Pórtico de Carga

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

b) Setup de montaje de la Barra Corrugada.

En el caso de la Barra de Acero Corrugado, el montaje de los sensores es más sencillo de realizar, ya que el espacio físico que se dispone para trabajar es mucho mayor.

Al igual que en la célula de carga, se adhirieron las galgas extensiométricas haciendo las conexiones a Puente Completo como se indica en la figura.

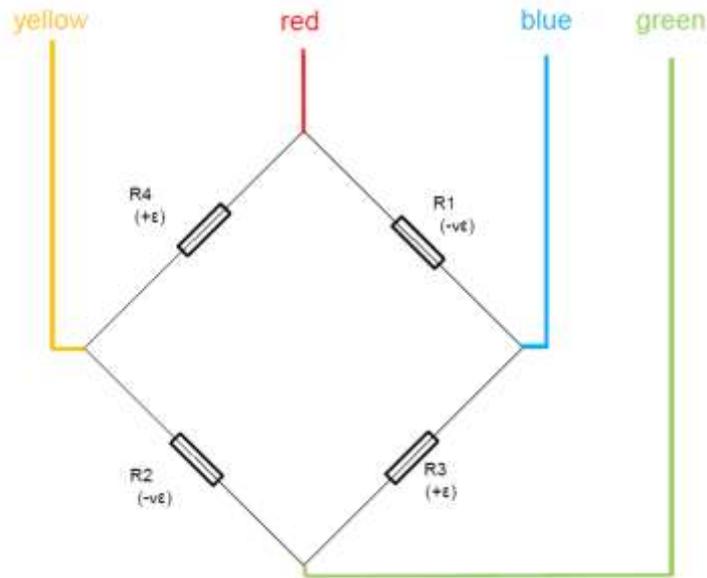


Figura 3- 12 Puente Completo de Wheatstone en Barra Corrugada

El código de colores seleccionado para hacer la configuración de Puente Completo, específico para la tarjeta de Adquisición de Datos NI 9237 sería:

AI+	→	Yellow
QTR/SC	→	Yellow
RS+	→	Red
EX+	→	Red
Ex-	→	Green
RS-	→	Green
AI-	→	blue

Figura 3- 14 Conexionado Puente Completo Barra Calibrada NI 9237

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Como también se hizo con la célula de carga, se instaló la Célula de Presión al equipo hidráulico obteniendo mediante los equipos de NI la gráfica Tensión-Deformación de la probeta ensayada.

El montaje de los gratings ópticos en el caso de la Barra Corrugada también fue más sencillo, ya que en una sola fibra se pudieron grabar los dos sensores. Por un mismo canal, la Unidad de Interrogación registra los datos de cada uno de los dos sensores instalados por separado.



Figura 3- 16 Instalación de los Gratings Ópticos a la Barra Calibrada



Figura 3- 15 Montaje de la Barra Calibrada en el Pórtico de Tracción

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

c) Resultados obtenidos.

La primera probeta que se llevó a ensayo fue la Célula de Carga. Una vez colocada en el pórtico, se generaron escalones de carga para ir viendo in-situ el comportamiento de los sensores de ambas tecnologías.

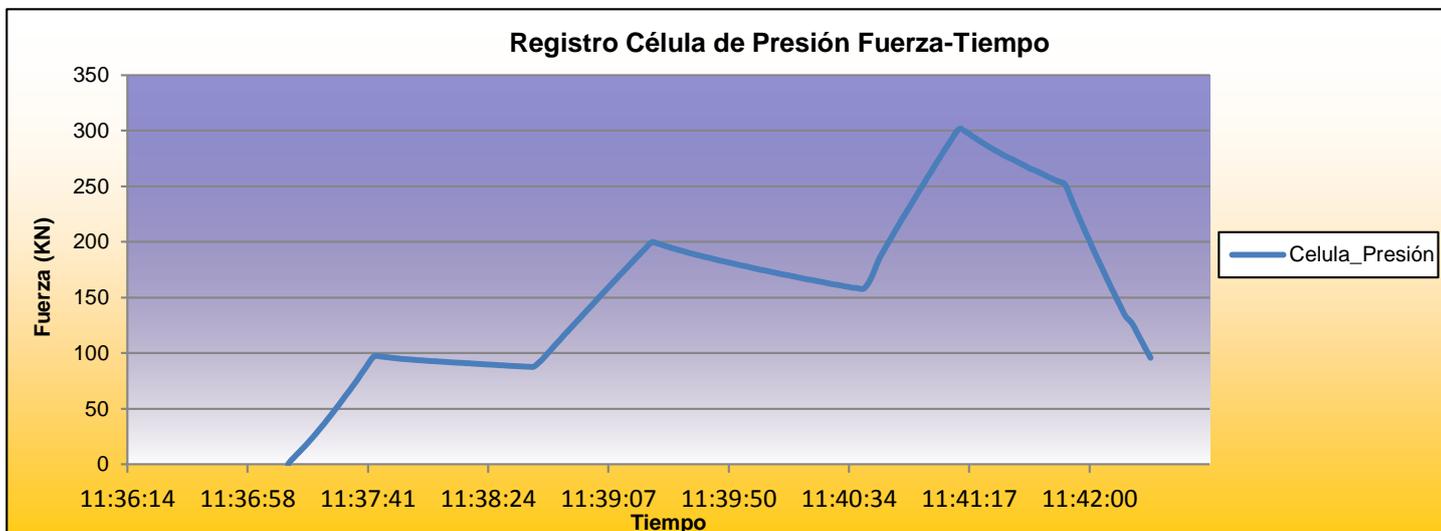


Figura 3- 17 Célula de Carga. Registro Célula de Presión.

Como se aprecia en la figura se dieron tres escalones de 100 KN, lo que equivale a 10 toneladas, a compresión llegando a un máximo de 300 KN (30tn).

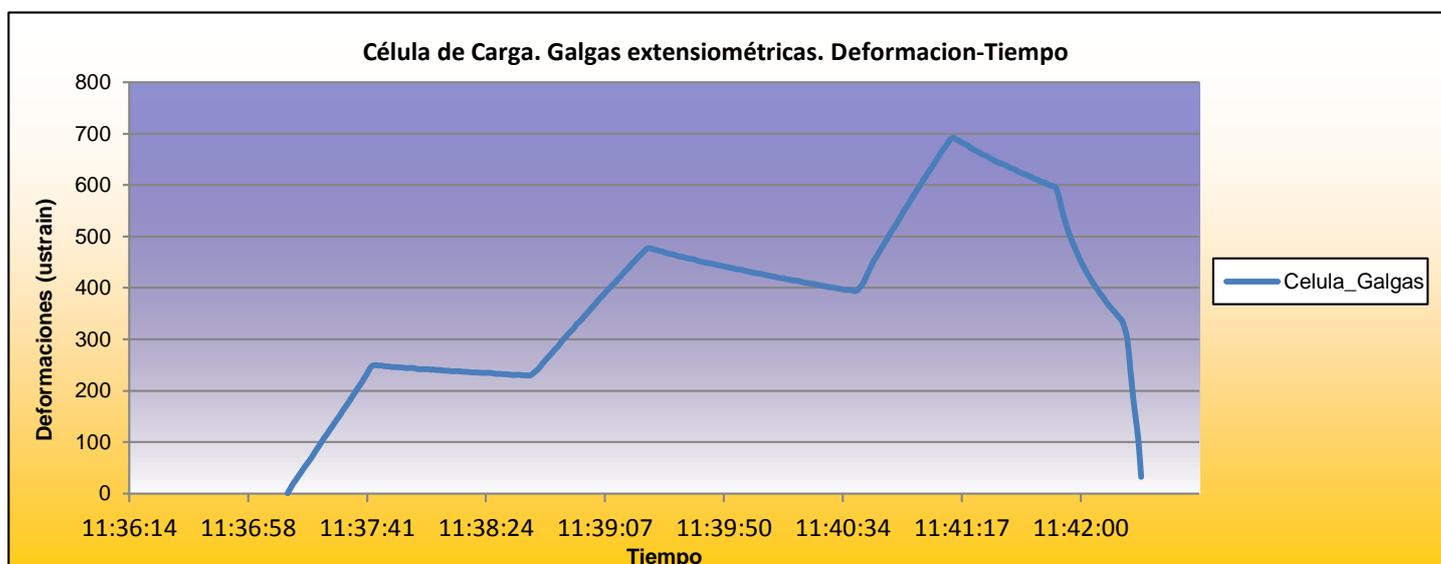


Figura 3- 18 Célula de Carga. Galgas Deformación-Tiempo

La Figura 3.18, muestra la gráfica Deformación-Tiempo de los galgas extensiométricas, como se puede apreciar en la misma, la deformación máxima alcanzable fue de 700 ustrain.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Como se ha comentado en puntos anteriores, la Unidad de Interrogación óptica nos muestra los valores de cada uno de los sensores ópticos por separado, como se puede observar en la Figura 3.19.

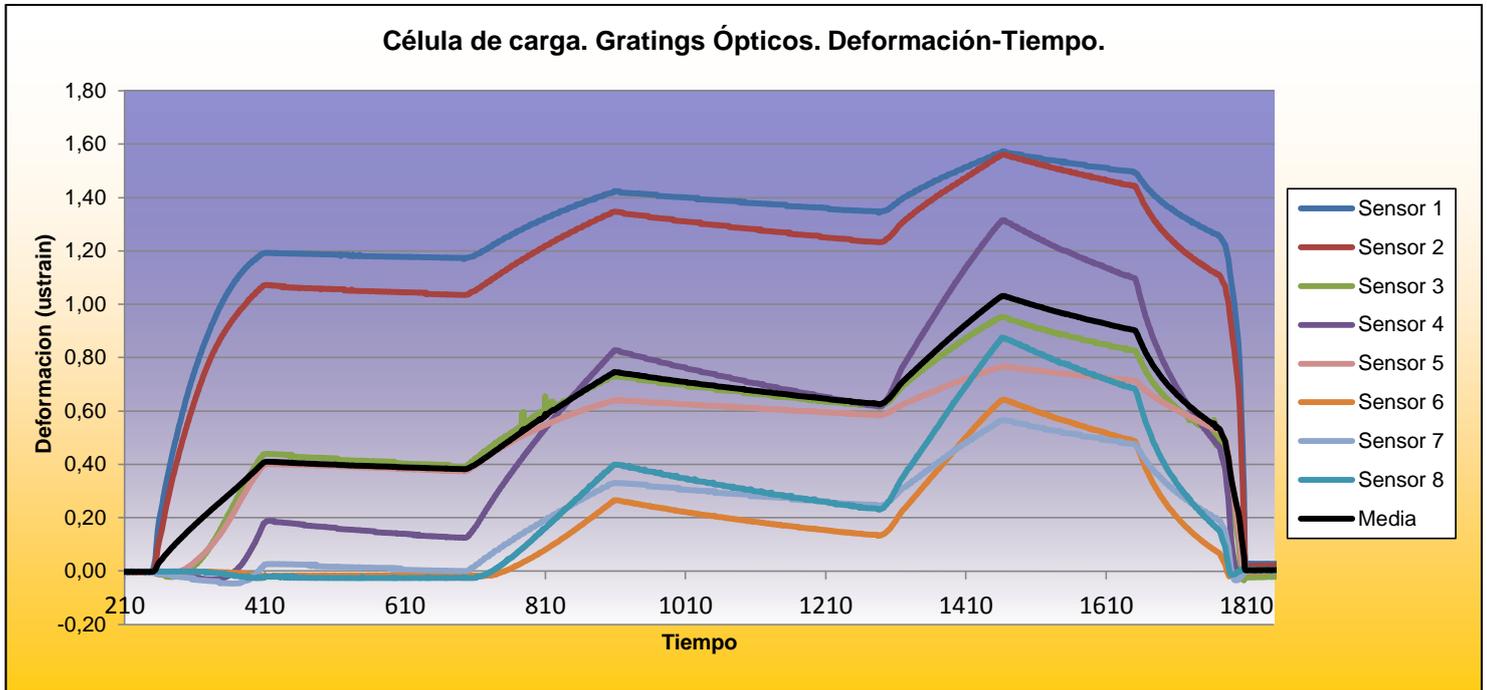


Figura 3- 19 Célula de Carga. Gratings Ópticos Deformación-Tiempo

Cada uno de los 8 gratings ópticos es representado por la Unidad de Interrogación por separado. Analizando los datos obtenidos, se puede apreciar que hay tres grupos de medidas, el sensor 1 y 2 están por encima de los demás, mientras que los sensores 6, 7 y 8 son valores inferiores a la media. Esto es debido a que la superficie de la célula con el pórtico no apoya perfectamente por igual, también el gato no llega a ejercer la misma fuerza en toda la superficie. Con estos sensores, al ser tan sensibles y al poder obtener la medida de cada uno por separado, podemos ver las diferencias en las deformaciones. Para tomar una medida de referencia, se realiza la media de los ocho sensores, siendo esta medida la línea negra de la Figura 3.19.

La instrumentación tradicional mediante galgas extensiométricas ya tiene todos los parámetros de galga introducidos, ya que tanto la tarjeta de adquisición NI-9237 tiene sus filtros y demás tecnologías para acondicionar la señal; también en el programa realizado mediante *LabView* están metidos todos los coeficientes necesarios. Además, la galga extensiométrica es un producto comercial, por lo cual el sensor está protegido por diferentes materiales, quedando

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

perfectamente colocado y adherido tras haber hecho los procedimientos explicados en el punto 2.2 c).

Esta explicación viene dada ya que los gratings ópticos no tienen este coeficiente de galga y la programación de la Unidad de Interrogación muestra los incrementos de longitudes de onda que ha sufrido la red de Bragg en cada momento.

Para reflejar mejor las medidas de los sensores con ambas tecnologías, se representarán a continuación las distintas graficas de las galgas extensiométricas y de los gratings reflejando la Fuerza (KN)-Deformación (ustrain).

A la hora de registrar la fuerza ejercida por el grupo hidráulico, se ha utilizado una tarjeta de NI-9205 que lee la señal de voltaje de la célula de presión. El programa realizado para registrar los datos de la célula de carga instrumentada mediante sensado tradicional de galgas, muestra a una frecuencia de 1Hz, estando sincronizadas tanto las deformaciones de las galas como la carga introducida al grupo hidráulico registrada por la célula de presión.

Para el registro de datos obtenidos mediante la unidad de interrogación del sensado mediante gratings ópticos, se ha hecho un tratamiento de datos a posteriori. A la hora de sincronizar la fuerza frente a las deformaciones, trabajando a la misma frecuencia de 1 Hz, se ha inicializado los valores en el mismo instante temporal donde tanto la fuerza como la deformación eran próximas a cero.

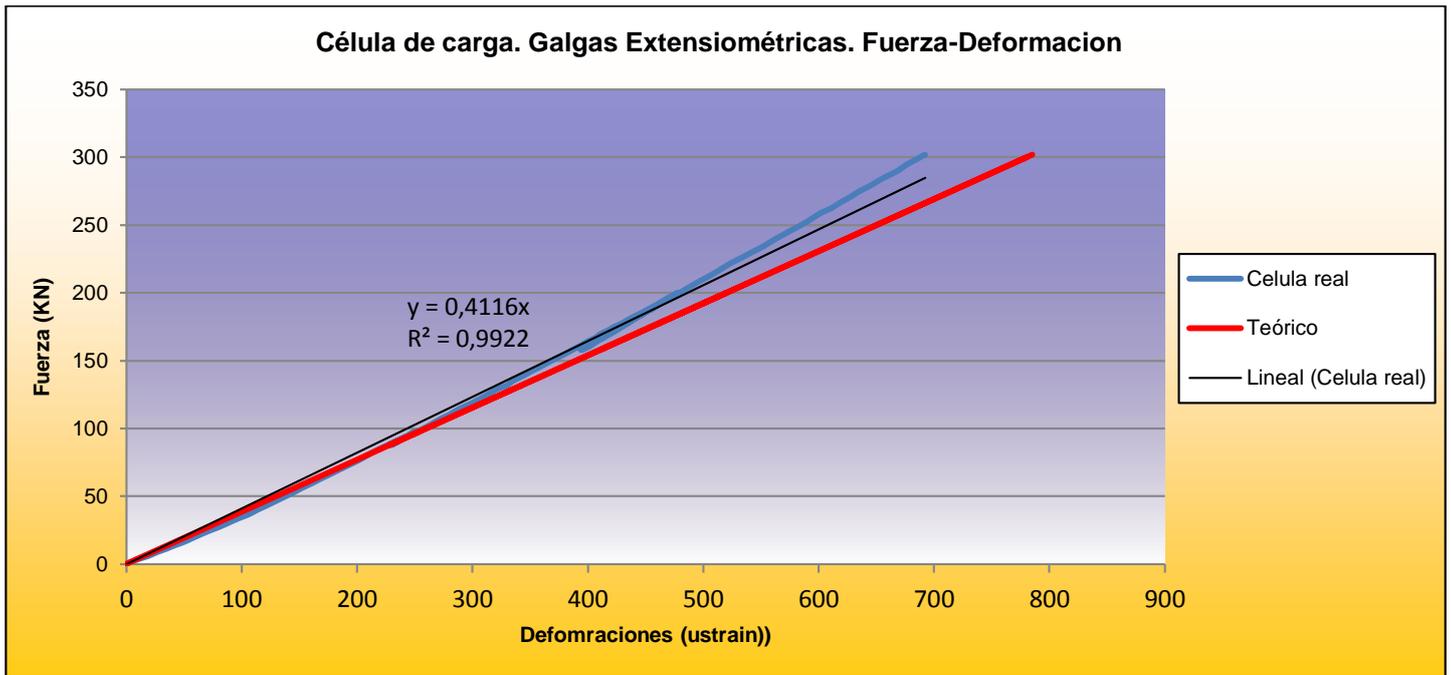


Figura 3- 20 Célula de Carga. Galgas Extensiométricas Fuerza (KN)-Deformación (ustrain)

Entrando a analizar el comportamiento de la célula de carga mediante la instrumentación clásica mediante galgas, se aprecia que la tendencia es la correcta, ya que es similar a la teórica y añadiendo la recta de tendencia, la pendiente tiende a la unidad.

El cálculo que se ejecuta para obtener las deformaciones teóricas frente a la fuerza ejercida por el grupo hidráulico se realiza como el cociente de la fuerza registrada por la célula de presión en Newton entre la superficie efectiva de la célula de carga, multiplicado por el módulo de elasticidad del acero y pasándolo a unidades de ustrains.

$$\frac{F(N)}{\Omega} * \varepsilon_{Acero} * (\mu\varepsilon)$$

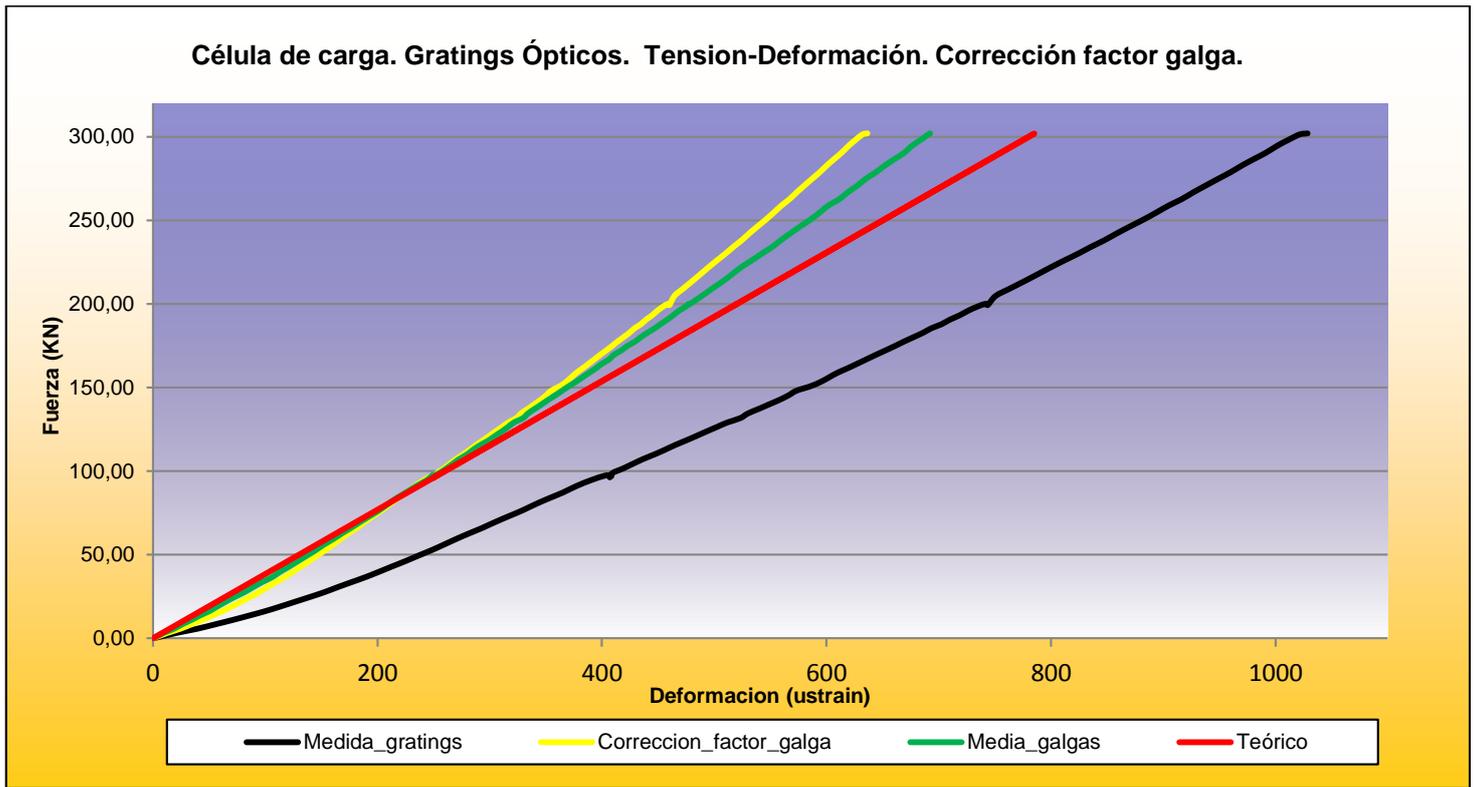


Figura 3- 21 Célula de Carga. Gratings Ópticos Fuerza (KN)-Deformación (ustrain)

En la Figura 3.21 se muestra la medida registrada por los gratings sin el factor de galga en color negro, y una vez añadido el factor de galga en color amarillo. Como se puede apreciar, la tendencia es la correcta.

Hay que tener en cuenta que, como ya se ha dicho en otros puntos, el sensor óptico está en fibra desnuda (sin protecciones adicionales), por tanto la adhesión al acero no es tan precisa como debiera, como si se tratara de un sensor comercial con los materiales añadidos de protección. Llevando esto a los resultados obtenidos, es posible que a partir de cierta carga el grating empiece a deslizarse por el pegamento y por ello aparece la pendiente que se aprecia en la línea amarilla.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

La segunda probeta llevada a ensayo fue la Barra de Acero Corrugada. Al igual que en el caso de la célula de carga, una vez puesta en el pórtico de tracción, se pasó a registrar los datos por ambas tecnologías. La carga fue introducida por escalones para ver in-situ el comportamiento de las mismas.

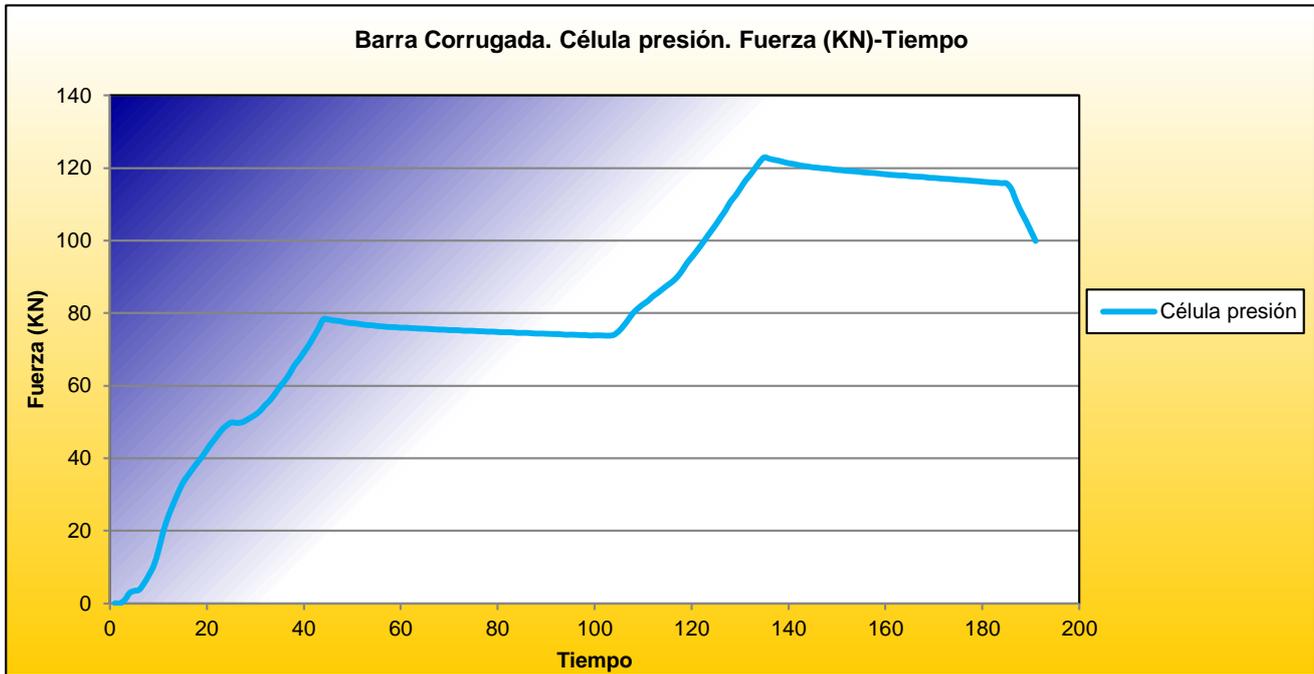


Figura 3- 22 Barra Corrugada. Célula presión. Fuerza (KN)- Tiempo

En un principio, se dieron dos escalones de carga hasta llegar a los 120 KN lo que equivale a 12 toneladas de carga a tracción.

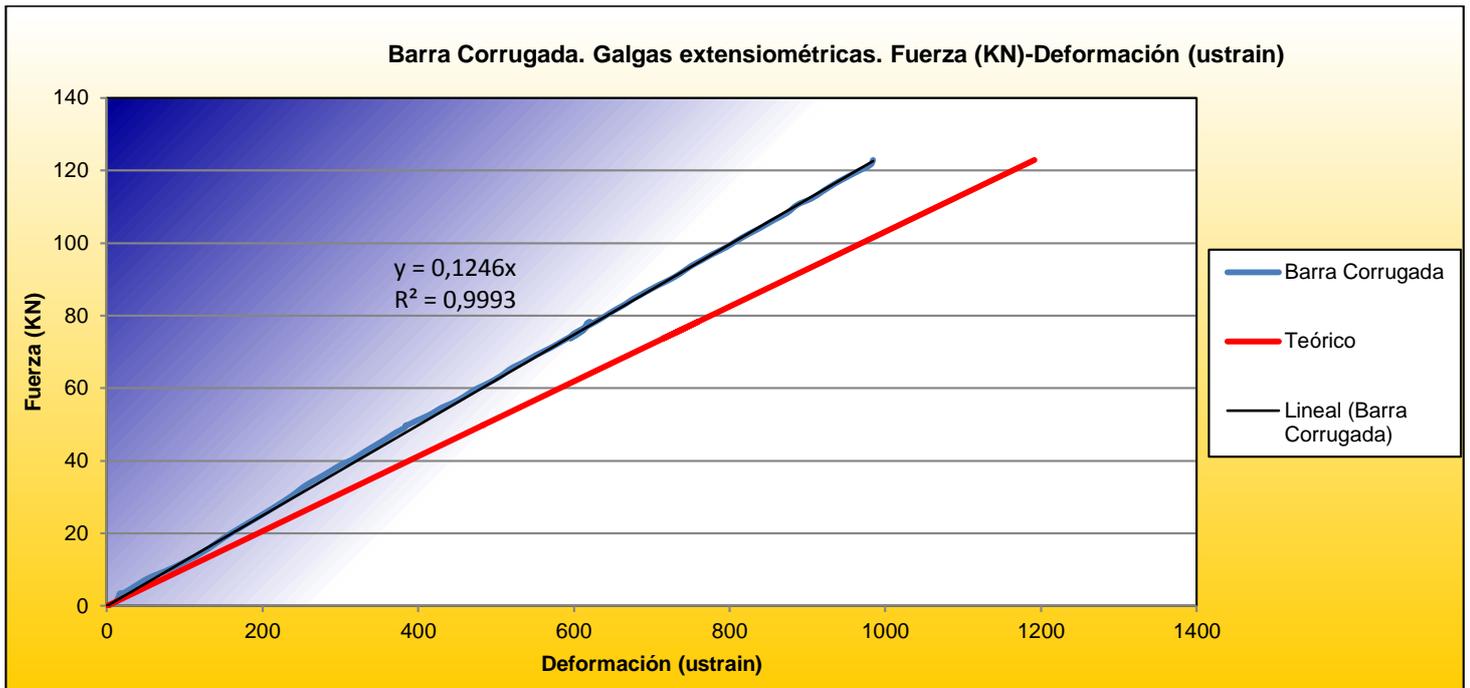


Figura 3- 23 Barra Corrugada. Galgas extensiométricas. Fuerza (KN)- Deformación (ustrain)

En la Figura 3.23, se muestra la gráfica fuerza deformación de la Barra Corrugada instrumentada mediante galgas extensiométricas y el teórico correspondiente para esa carga. Como se puede ver, el comportamiento es totalmente similar al teórico. Para corregir la diferencia de pendiente respecto a la teórica, hay que multiplicar por una constante correctora. Este parámetro no es del todo necesario para este ensayo, ya que lo se pretende es demostrar la linealidad del sensor con la carga.

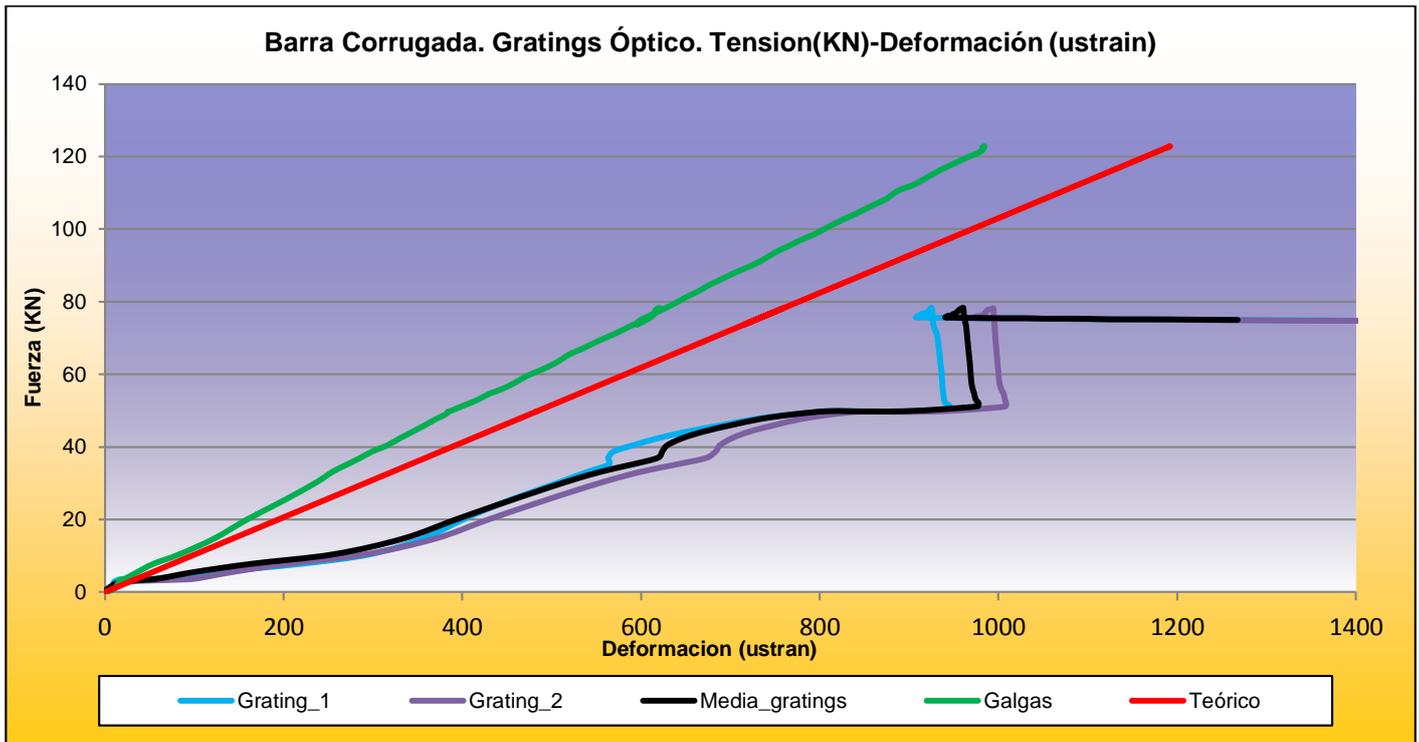


Figura 3- 24 Barra Corrugada. Gratings Ópticos. Tensión (KN)-Deformación (ustrain)

En la gráfica anterior, Figura 3.24, se representa la gráfica Fuerza-Deformación de la Barra Corrugada tanto con la instrumentación clásica de galgas extensiométricas en color verde, como los dos grating ópticos y su media, además de la deformación teórica respecto a la fuerza ejercida por el grupo hidráulico.

Analizando los casos representados, se puede ver que los grating ópticos llevan una tendencia correcta, pero se han ido deslizando de la barra, hasta el momento de rotura del sensor a partir de los 60KN. Al igual que sucedió en la célula de carga, el sensor está grabado en un fibra desnuda sin las protecciones propias de un sensor comercial. Esto, junto a la rigidez del pegamento utilizado para la adhesión del sensor, que no permite la elasticidad que necesita el sensor para cuantificar la deformación de la probeta, hace que aparezcan estas curvas en la gráfica.

Tomando como referencia la media de los dos sensores ópticos y asumiendo este deslizamiento del sensor sobre la barra, vuelve a surgir la necesidad de añadir el factor corrector de galga. Se adjunta figura con el factor de galga añadido.

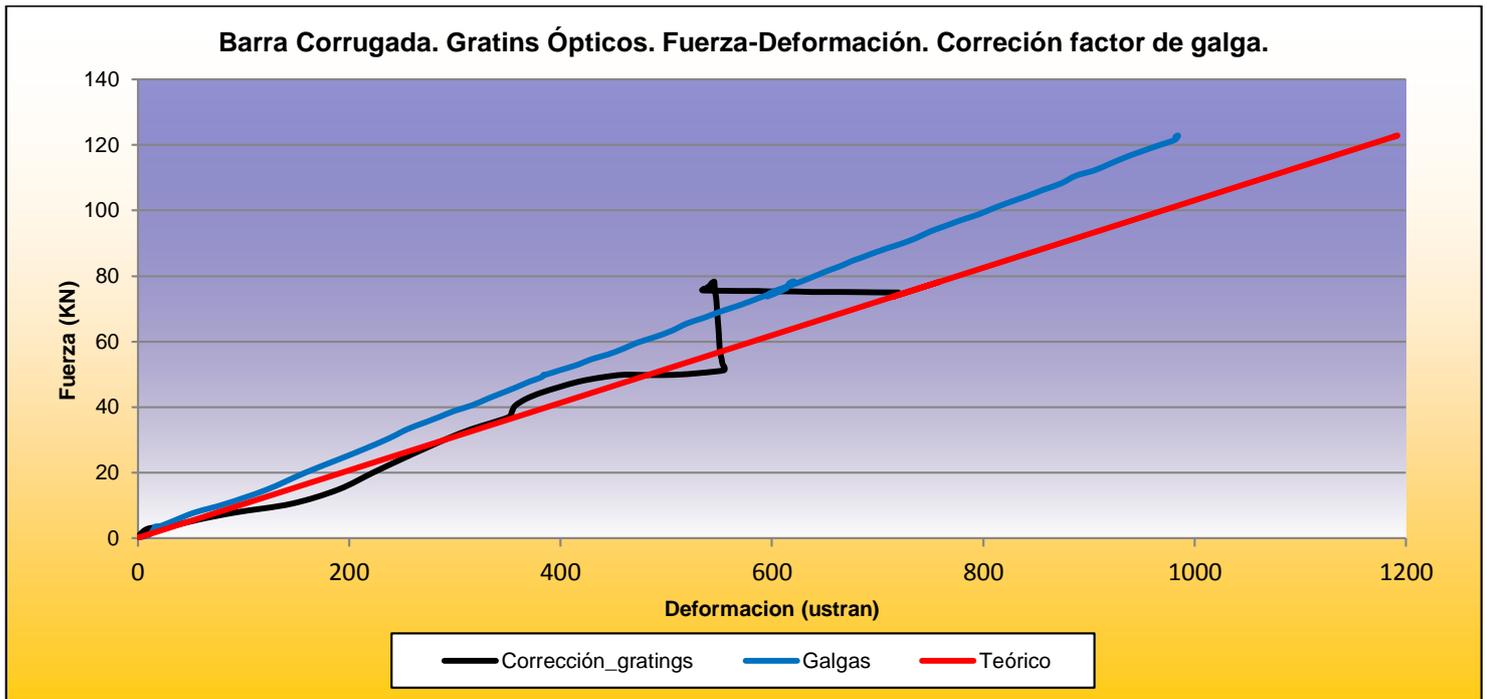


Figura 3- 25 Barra Corrugada. Gratings Ópticos. Fuerza (KN)-Deformación (ustrain). Corrección factor de galga.

Una vez hecha la corrección del factor de galga y asumiendo el deslizamiento del sensor por la barra, se aprecia que la tendencia de la instrumentación mediante sensor óptico es la correcta.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

4. Conclusiones y Líneas Futuras.

El objetivo de este Proyecto consiste en hacer una comparativa real en una célula de carga y en una barra corrugada con dos métodos distintos de instrumentación, el tradicional mediante galgas extensiométricas y mediante sensores en fibra óptica basados en redes de difracción o *gratings* ópticos.

Los problemas con el ruido eléctrico que tanto interfiere en los sensores de galgas extensiométricas en los contextos típicos de trabajo donde se instalan estos sensores, como es la obra civil, llevan a la necesidad de investigar y abrir camino hacia otras tecnologías donde este problema no exista.

Una vez instrumentadas las dos probetas con las dos tecnologías de instrumentación, las galgas y los *gratings*, se ensayan en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Caminos de Santander, dando unos resultados dentro de los márgenes previstos.

En primer lugar, se instalan los sensores de ambas tecnologías en la Célula de Carga, los resultados de las galgas son los esperados ya que este tipo de célula con esta instrumentación ya ha sido comercializada por el grupo de investigación GiaDe, teniendo unos resultados estudiados, valorados y confirmados en diferentes proyectos.

Sin embargo, la instrumentación de células de carga con la tecnología de *gratings* ópticos, posiblemente no esté tan estudiada y ensayada. Como ya se ha explicado en puntos anteriores, los *gratings* están grabados sobre fibra desnuda, lo que conlleva asumir los errores típicos de adhesión a la probeta, los coeficientes de factor de galga, etc. Para cuantificar estos errores y poder obtener unas conclusiones es necesario instrumentar y hacer diferentes ensayos. Las células de carga instrumentadas con extensiométrica tradicional,

En el caso de la Barra Corrugada, obtenemos unos valores similares a los de las galgas y al teórico. En este caso, el alargamiento que sufrió la barra fue mucho mayor y por tanto los problemas de deslizamiento de los *gratings* por la probeta aumentaron. Aun así, este problema se conocía de antemano, por lo que se asume y se corrige.

Las ventajas claramente estudiadas de los sensores ópticos frente a las galgas tradicionales son varias: en primer lugar está el ruido eléctrico. En el sensado óptico no interfiere la energía eléctrica, ya que la fibra óptica que actúa como sensor y medio de transmisión es inmune a la interferencia electromagnética. Gracias a ello, se eliminarían los ruidos eléctricos de

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

los sensores tan típicos en los proyectos de instrumentación donde el ruido eléctrico es difícil de cuantificar, de filtrar y prevenir.

Otra ventaja clara es la capacidad de poder grabar diferentes sensores en un solo canal, con lo que se podría ahorrar en cableado. En el caso de una célula de carga de las dimensiones que se ha ensayado, se instalan 8 sensores. Sin embargo, para otro tipo de casos, como es la instrumentación de tirantes de carga en un puente atirantado, las dimensiones de la célula son mucho mayores lo que exige instalar un número de sensores también mucho mayor.

Al igual que en las galgas extensiométricas, la afectación de la temperatura en los sensores ópticos existe, es inevitable y compleja a la hora de discriminarla. La diferencia existente entre una tecnología y otra es que en el sensado óptico no es necesario añadir una red de difracción compensatoria en cada sensor de medida, por lo que se reduce el número de sensores en la instrumentación de las probetas. Esto a largo plazo, repercute en términos económicos.

La oxidación es una desventaja que tienen las galgas extensiométricas frente al grating óptico. Una galga no deja de ser un pequeño hilo de cobre, que con la humedad y el paso del tiempo puede deteriorarse, sin embargo, el grabado de sensores en fibra óptica no tiene este tipo de problemas, siendo su vida útil mucho más larga y segura.

Tras el estudio y la experiencia obtenida en el ámbito de la instrumentación, sobre todo centrada en la obra civil para realizar este proyecto, puede ser interesante seguir trabajando y ensayando la instrumentación de distintas probetas utilizando sensores ópticos.

En el caso expuesto, se han utilizado redes de Bragg, pero existen otros tipos de sensores como los basados en el scattering de Brillouin. Esta tecnología no está tan madura como las Redes de Bragg, por lo que puede ser una continuación a este documento.

La instrumentación de estructuras, que es la base de este proyecto, requiere de otro tipo de medidas a parte de deformaciones de materiales, como son las medidas dinámicas típicas para evitar las resonancias con el viento u otros factores de vibración.

Utilizando Redes de Bragg u otra tecnología de sensado óptico, se pueden tener instrumentadas largas estructuras en un mismo hilo de fibra óptica, lo que a la hora de conocer el comportamiento de una estructura es muy importante.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

Otra de las posibles líneas futuras que continúen este trabajo pudiera ser el montaje de unidades de medidas móviles, con un interrogador y un analizador pequeño y económico, con un software de adquisición de datos desarrollado específicamente para la necesidad del cliente, capaz de tomar medidas en tiempo real e in-situ, de una estructura previamente instrumentada.

Hecho este "*brainstorming*", podemos concluir diciendo que sería muy interesante hacer una instrumentación de una estructura compleja, utilizando solo y exclusivamente sensores ópticos.

5. Referencias

1. GiaDe. (s.f.). *Grupo de Instrumentacion y Análisis Dinámico de Estructuras de Obra Civil*. Obtenido de <http://www.giade.unican.es/>
2. Alonso, Á. G. (2014). *Tesis Doctoral: Instrumentación Viaducto del Tajo, Tramo AVE Cañaveralembalse de Alcantara*.
3. José Antonio Peralta, P. R. (2009). El fenómeno de la resonancia. *Lajpe*.
4. Spain, N. I. (s.f.). National Instrument. <http://spain.ni.com/>
5. MIDAS. *simulsoft*. Obtenido de simulsoft-ingenieros: <http://www.simulsoft-ingenieros.es/>
6. AUTOCAD. (s.f.). Obtenido de <http://www.autodesk.es/products/autocad/overview>
7. Smart Santander, S. (s.f.). Obtenido de <http://www.smartsantander.eu/>
8. *American Society of Civil Engineers*. (s.f.). Obtenido de <http://ascelibrary.org/>
9. GiaDe. (2014). *Determinación de la fuerza de tesado de tirantes mediante la Teoría de Cuerda Vibrante*.
10. Quirantes, A. (15 junio 2012). La resonancia bien entendida: El puente Arcos de Alconéctar. *Naukas*.
11. Górriz, B. T. (2012). *DEFINICIÓN DE LAS PAUTAS Y CONDICIONES DE MONITORIZACIÓN, ENCAPSULADO Y FIJACIÓN DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA PARA LA MEDIDA DE DEFORMACIÓN Y TEMPERATURA EN ESTRUCTURAS*. Valencia
12. Mercedes Granda Miguel, E. M. (2010). *Instrumentación electrónica: Transductores y acondicionadores de señal*. Santander: Universidad de Cantabria
13. Wikipedia, F. Ó. (s.f.). *Wikipedia*.
14. Lee, B. (2003). Review of the present status of optical fiber sensor. *Elsevier, Optical Fiber Technology* 9, 57-79.
15. K.O. Hill, Y. F. (1978). Photosensitivity in optical fiber waveguides: application. *Applied Physics*, 32, 647-649.
16. 43–57., B. W. (1913). The Diffraction of Short Electromagnetic Waves by a Crystal. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 17, 43-57.
17. J.Mihailov, S. (2012). Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Enviroments. *Sensors*, 12, 1890-1918.

Análisis comparativo entre instrumentación clásica de galgas extensiométricas y sensores ópticos para la monitorización en una célula de carga.

18. Lee, B. (2003). Review of the present status of optical fiber sensor. *Elsevier, Optical Fiber Technology* 9, 57-79.
19. NI-9237. Módulo de entrada analógica de Puente de $\pm 25\text{mV}$, 50ks/s , 4 Canales.
20. NI-cDAQTM-9188. Chasis NI CompactDAQ Ethernet de 8 Ranuras.
21. NI-9205. Módilo de $\pm 200\text{mV}$ a $\pm 10\text{V}$, Entrada Analógica, 250ks/s , 32 Canales.

6. Anexos Técnicos

FiberSensing

bringing light to measurement

**PORTABLE BraggMETER
USER MANUAL**

**FS 4100
4200**



measurement units

FS 4100 • FS 4200 Portable BraggMETER User Manual

User Manual version: March.2009

Any questions or comments regarding this guide please report to:
support@fibersensing.com

“FiberSensing”
“BraggMETER”
“BraggSCOPE”
“bringing light to measurement”

are registered trademarks from FiberSensing, Sistemas Avançados de Monitorização, SA.

1. INDEX

TECHNICAL DETAILS	6
GENERAL INFORMATION	6
SYSTEM COMPONENTS	6
TECHNICAL DATA	7
REGULATORY AND CERTIFICATION CONSIDERATIONS	8
CE CONFORMITY	8
PRODUCT USAGE RESTRICTIONS	9
COUNTRIES USAGE RESTRICTIONS AND DEVICE POWER OUTPUT	10
EUROPEAN RESTRICTIONS	10
WIRELESS POWER OUTPUT CONSIDERATIONS	11
ENVIRONMENT CONSIDERATIONS	11
DISPOSAL OF YOUR OLD APPLIANCE	11
OPERATION	13
CONNECTORS	13
SETTING UP	14
PROTECTION AND CARRYING BAG	14
SWITCHING ON	14
MEASURING EXAMPLES	17
MEASURING IN 5 STEPS	17
TYPICAL CONFIGURATION	17
FS BANDS	18

2.**TECHNICAL DETAILS****GENERAL INFORMATION**

The FiberSensing Portable BraggMETER is a continuous swept laser scanning measurement unit for interrogating fiber Bragg grating (FBG) sensors. The measurement unit includes a NIST traceable wavelength reference that provides continuous calibration to ensure system accuracy over long term operation. The high dynamic range and high output power allows high resolution to be attained even for long fiber leads and lossy connections.

Over 12 sensors can be connected in series in each optical fiber, which in combination with the optional 4 optical channels makes this measurement unit particular suitable for large scale sensing networks, acquiring a large number of sensors, providing 1S/s or 100S/s acquisition rates, with a resolution better than 2 pm.

Note: For higher acquisition rates accuracy may be affected by the distance of the sensor to the measurement unit. Refer to the iLog User Manual on section «Configuring tree elements – Sensors» or visit www.fibersensing.com for further information.

SYSTEM COMPONENTS

The Portable BraggMETER set includes:

- : Measurement Unit
- : AC Adapter power supply
- : Power cord
- : Protection and carrying bag
- : Connector protection caps
- : Touch screen pen

TECHNICAL DATA

Wavelength Measurement	
operating range	80 nm (1510 to 1590 nm)
resolution	1.0 pm (1 S/s) 2.0 pm (100 S/s)
absolute accuracy	1.0 pm (1 S/s) 50 pm (100 S/s)
repeatability	1.0 pm (1 S/s) 5.0 pm (100 S/s)
sensors per fiber	25 (maximum recommended)
optical channels	FS4100: 1 FS4200: 4 (in parallel)
sample rate	1 S/s, 100 S/s
ASE Source	
optical output power	FS4100: 0 dBm FS4200: -6dBm
Line width	500 MHz
optical isolation	> 70 dB
Inputs / Outputs	
optical connectors	FC/APC
Datalogger	
functions	sampling, archiving and transmission
interface	touch screen GUI, Ethernet, USB, LabVIEW™ drivers
data format	mySQL database; Excel™ compatible files
Environmental	
operation temperature	0 to 50° C
relative humidity	< 90% at 40° C
Mechanical	
dimensions	360 x 275 x 100 (mm)
weight	7.3 kg
Power	
voltage	9-18 VDC
power	90 W
autonomy	3.5 hours

3.

REGULATORY AND CERTIFICATION CONSIDERATIONS

CE CONFORMITY



The Portable BraggMETER is a FiberSensing product that complies with legal European certification standards – CE Certification.

The manufacture company

FiberSensing, Sistemas Avançados de Monitorização, S.A.
Rua Vasconcelos Costa, 277
4470-640 Maia
Portugal

Declares under sole responsibility that the product type as originally delivered

Product name: **Measurement Unit for optical Sensors**

Product trademark: **FiberSensing**

Product model: **FS 4100/ FS 4200 Portable BraggMETER**

Product version: **04**

Product options: **all product options**

Is in compliance with the essential requirements, harmonized applicable standards, and carries the CE marking and other relevant provisions accordingly following directives:

Directives **2006/95/EC** relating **Electrical Safety**

Directives **2004/108/EC** relating **Electromagnetic Compatibility**

Directives **1999/5/EC** relating **Radio and Telecommunications Terminal Equipment (R&TTE)**

The Portable BraggMETER product design includes a “Wireless – G PCI Adapter @ 2.4GHz (802.11g)” and should be highlight that it has been followed the Article 10.4 and Annex III of Directive 1999/5/EC (EN 300 328) – Radio and Telecommunications Terminal Equipment (R&TTE) that does not oblige the reference of any notified body on the equipment when the manufacturer use the test suites of harmonized standards.

Electrical Safety Standards:

EN 61010-1: Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use – Part 1: General requirements

EN 60825-1: Laser Safety Standards – part 1: equipment classification, requirements and user's guide

Electromagnetic Compatibility Standards:

EN 61326: Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC Standards:

Emission:	EN 55022 – class B; EN 61000-3-2; N 61000-3-3;
Immunity:	EN 61000-4-2 (level 3); EN 61000-4-3 (level 3); EN 61000-4-4 (level 3); EN 61000-4-5 (level 3); EN 61000-4-6 (level3); EN 61000-4-8; EN 61000-4-11.

Radio Standards:

EN 300 328: Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band;

The original **CE DofC (CE Declaration of Conformity)** of Portable BraggMETER product is available through FiberSensing website – www.FiberSensing.com, under directly FiberSensing contact or FiberSensing reseller contact.

Additionally the Portable BraggMETER product robustness complies with European Telecommunications Standards Institute (ETSI) environmental conditions and tests for telecommunications equipment:

- Storage: ETSI EN 300 019-2-1, under class T 1.1:
“Weatherprotected, partly temperature-controlled storage locations”;
- Transportation: ETSI EN 300 019-2-2, under class T 2.2:
“Careful transportation”;
- Portable and non-stationary use: ETSI EN 300 019-2-7, under class T 7.1:
“Temperature controlled – locations”.

PRODUCT USAGE RESTRICTIONS

The Portable BraggMETER has a specific feature that allows users to access external computer networks with wireless capability: “Wireless – G PCI Adapter @ 2.4GHz (802.11g)”. The specific hardware “Wireless – G PCI Adapter” that gives Portable BraggMETER product the capability of access external computers networks via Wireless technology is in compliance with the essential requirements and other relevant provisions of CE Certification following European Union Directive 1999/5/EC. However the “Wireless – G PCI Adapter” has product usage restrictions that Portable BraggMETER product implicitly inherited. For more details please read carefully the following paragraphs.

Note: The Wireless feature of Portable BraggMETER product is designed for indoor usage only. Outdoor usage is not recommended, unless otherwise noted. The wireless functionality is controlled by Windows™. For wireless enable or disable procedure please refer to Windows™ technical guide.

The Portable BraggMETER product is designed to operate only with the standard dedicated external antenna that is shipped together with the equipment. Do not use any combinations of extension cables because it may result in a radiated power level that may exceed legal threshold of 100mW EIRP.

Attention! Combinations of antenna extension cables resulting in a radiated power level exceeding 100mW EIRP are illegal.

COUNTRIES USAGE RESTRICTIONS AND DEVICE POWER OUTPUT

The following paragraphs describe countries usage restrictions that Portable BraggMETER product implicitly inherited due to “Wireless – G PCI Adapter”. For more details please see carefully the following paragraphs.

EUROPEAN RESTRICTIONS

The Portable BraggMETER “Wireless – G PCI Adapter” may be used in all EU countries (and other countries following the EU directive 1999/5/EC) without any limitation except for the countries mentioned below:

BELGIUM RESTRICTIONS

The Belgian Institute for Postal Services and Telecommunications (BIPT) must be notified of any outdoor wireless link having a range exceeding 300 meters. Please check <http://www.bipt.be> for more details.

FRANCE RESTRICTIONS

In case the Portable BraggMETER product is used outdoors, the “Wireless – G PCI Adapter” output power is restricted in some parts of the band. See following table or check <http://www.arcep.fr/> for more details.

Applicable Power Levels In France		
Location	Frequency Range (MHz)	Power (EIRP)
Indoor (no restrictions)	2400-2483.5	100 mW (20 dBm)
Outdoor	2400-2454	100mW (20 dBm)
	2454-2483.5	10 mW (10 dBm)

ITALY RESTRICTIONS

The Portable BraggMETER "Wireless – G PCI Adapter" feature meets the National Radio Interface and the requirements specified in the National frequency Allocation Table for Italy. Unless this 2.4-GHz wireless LAN product is operating within the boundaries of the owner's property, its use requires a "general authorization". Please check <http://www.comunicazioni.it/it/> for details.

WIRELESS POWER OUTPUT CONSIDERATIONS

Generally and typically the Portable BraggMETER "Wireless – G PCI Adapter" maximum output power is 18 dBm (64mW) and this "Wireless – G PCI Adapter" does not allow adjustment of the output power. In order to respect countries usage restrictions, disable Portable BraggMETER "Wireless – G PCI Adapter" feature using Portable BraggMETER graphical user interface.

Note: It is strongly recommended that user fully respect the countries usage restrictions. Use Windows™ to enable or disable this wireless feature whenever needed.

ENVIRONMENT CONSIDERATIONS

DISPOSAL OF YOUR OLD APPLIANCE



When the attached symbol combination – crossed-out wheeled bin and solid bar symbol is attached to a product it means the product is covered by the European Directive 2002/96/EC.

All electrical and electronic products should be disposed of separately from the municipal waste stream via designated collection facilities appointed by the government or the local authorities. The correct disposal of your old appliance will help prevent potential negative consequences for the environment and human health. For more detailed information about disposal of your old appliance, please contact your city office, waste disposal service or distributor that purchased the product.

FiberSensing is a producer registered in the ANREEE - "Associação Nacional para o Registo de Equipamentos Electricos e Electrónicos" under number PTO01434. FiberSensing celebrated a "Utente" type contract with Amb3E - "Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos de Equipamentos Electricos e Electrónicos", that regulate the transfer of producer responsibility to Amb3E of Electrical and Electronic appliance waste management deriving of placing Electronic and Electrical appliances in the Portuguese market.

4.

OPERATION

CONNECTORS

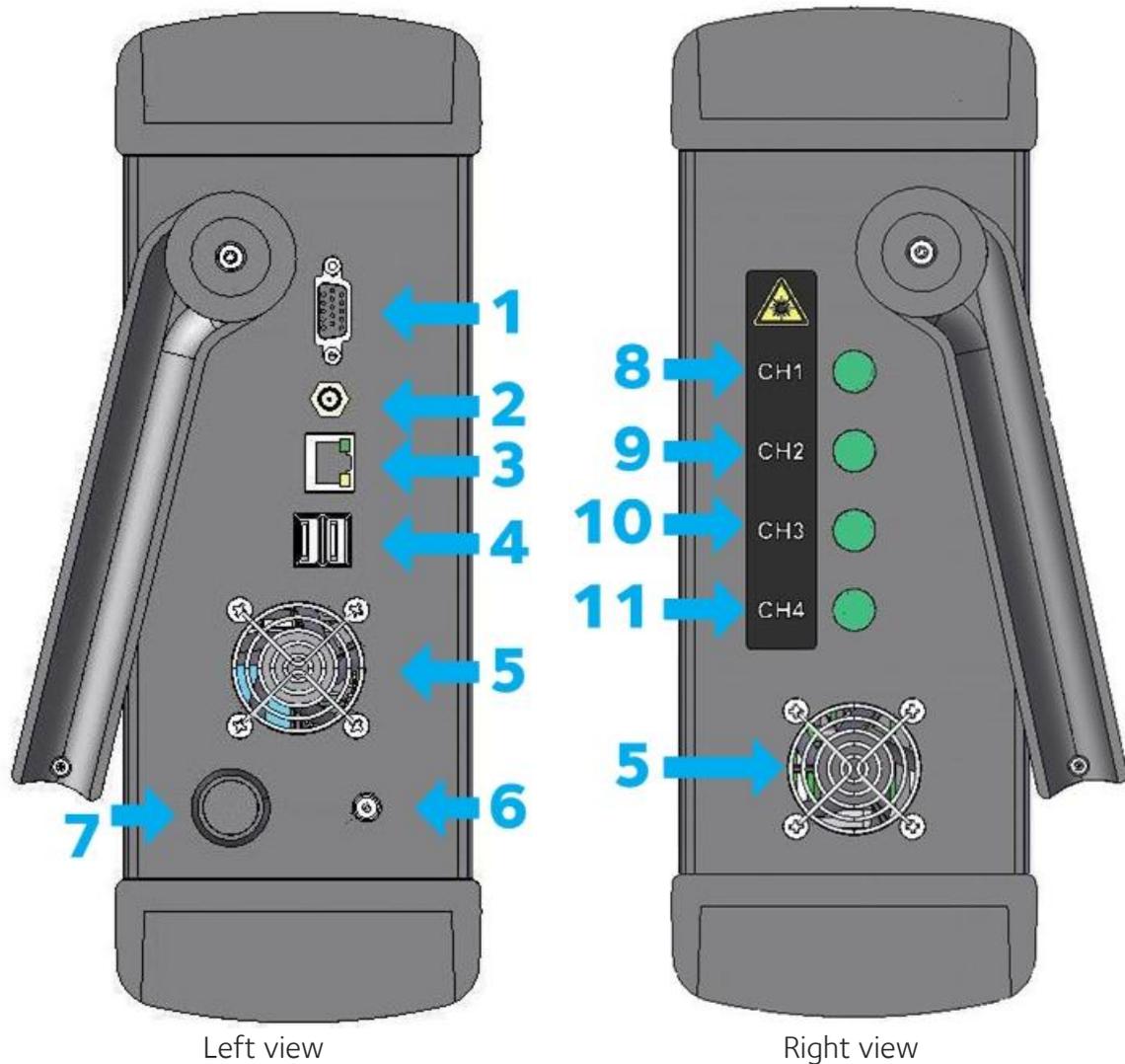


Figure 1

The connectors and buttons on Figure 1 are:

1. VGA Connector
2. CMA Connector
3. LAN Connector
4. USB Connector (2x)
5. Fan
6. Power Connector
7. ON/OFF button

8. Optical Channel Connector CHO
9. Optical Channel Connector CH1
10. Optical Channel Connector CH2
11. Optical Channel Connector CH3

SETTING UP

Before turning on the Portable BraggMETER for the first time, the batteries should be fully charged. For charging, connect the measurement unit to 100~240 V power line using the provided 20 V AC adapter. Once the measurement unit starts charging, the left sided fan (see Figure 1) will start working. A full charge with the measurement unit turned off should take about one and a half hours.

Attention! Battery with less than 30% of maximum charge will compromise the correct start up of the measurement unit.

To connect fiber Bragg grating based sensors to the Portable BraggMETER FC/APC connectors must be used (see on section Connectors Figure 1 on page 13). Attention should be paid to the cleaning of the connector. A dirty connector can compromise the measurement and will degrade the measurement unit. It is advisable to frequently clean the connectors using appropriate tools.

PROTECTION AND CARRYING BAG

To place or remove the protection and carrying bag, proceed as follows:

- : Remove the handle fixation protection cover;
- : With a Torx screw driver 20 unscrew the handle;
- : Remove the handle;
- : Place/Remove the bag from the measurement Unit;
- : Put back the handle on its place respecting its orientation;
- : Screw the handle.
- : Place back the handle fixation protection cover

SWITCHING ON

Pressing the "ON/OFF" button (see on section Connectors Figure 1 on page 13) will start the engine. The Measurement Unit software will automatically be launched. An information box on start up status and on software version will appear on the LCD touch screen.

Once the measurement unit is turned on both fans (see on section Connectors Figure 1 on page 13) will start working.

5. MEASURING EXAMPLES

MEASURING IN 5 STEPS

To start making an acquisition it takes no more than five easy steps.

1. Charge batteries;
2. Turn on the Portable BraggMETER Measurement Unit;
3. Connect one sensor to an Optical Channel;
4. Click Auto Scan Button on the SENSORS Tab;
5. Hit the Run Button on the DISPLAY Tab or OSA Tab.

TYPICAL CONFIGURATION

Typically, a FBG's Sensing Network is divided into branches of sensors connected in series. On Figure 2 there is a scheme of a usual FBG sensing branch.

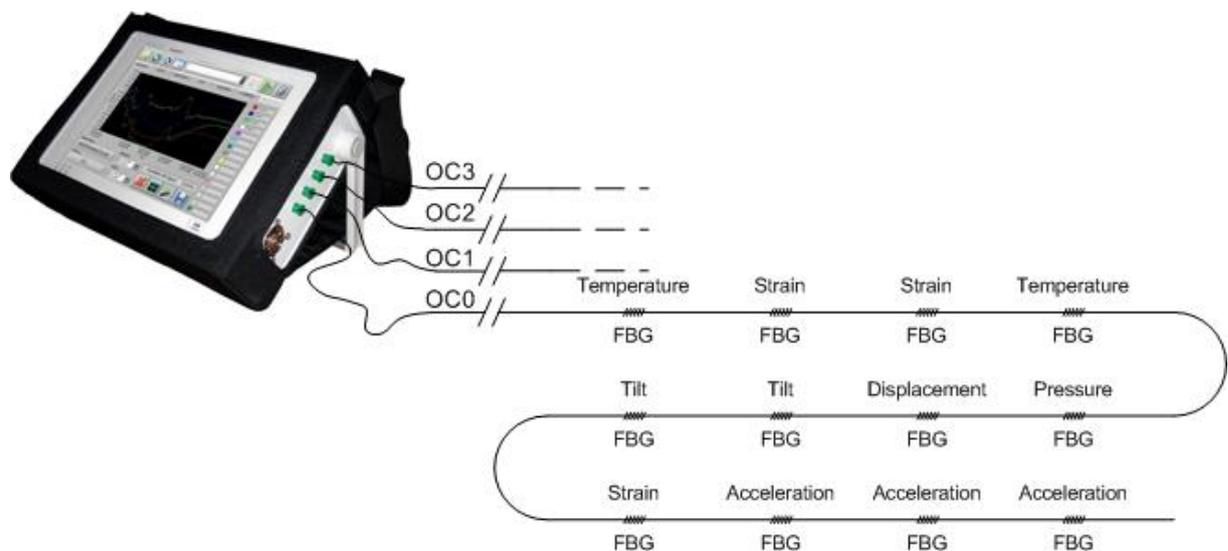


Figure 2

Each branch can reach 12 FS Standard sensing gratings in series. This number can increase if there is the knowledge on how the sensors will behave. The major concern is the overlap of two neighbors' ranges. The available optical channels have simultaneous acquisition, meaning that the sensing network can have a large number of fiber Bragg sensors interrogated at the same time.

The employed technology allows a multi-functionality meaning that on the same branch it is possible to measure Strain, Temperature, Displacement, Pressure, Acceleration, etc...

The sensing network can be up to 10 km away from the Measurement Unit for there are no EM/RF interferences or significant losses to the optical fiber.

Each FBG sensor has a characteristic Central WaveLength that depends only on the measurand. This means that with this technology there is no need for recalibrations every time the system is shut down.

The Portable BraggMETER is a portable measurement unit designed to be autonomous (uses battery) and easy to carry (small size and reduced weight) to be plainly used in different projects.

FS BANDS

The FiberSensing Standard Bands are:

FiberSensing Bands	
	Central WaveLength (nm)
A	1528.87
B	1535.13
C	1541.49
D	1547.86
E	1554.28
F	1560.75
G	1567.23
H	1573.75
I	1580.16
J	1586.57
K	1516.07
L	1522.47

1200 Series / 1600 Series – OEM Transducers Featuring Exceptional Proof Pressure and Stability Specifications

- ▶ Gauge, Vacuum, and Compound Pressure Models
- ▶ General Purpose and Wash down Enclosures
- ▶ High Proof Pressure Achieved by Thicker Diaphragm Construction
- ▶ Voltage and Current Output Models

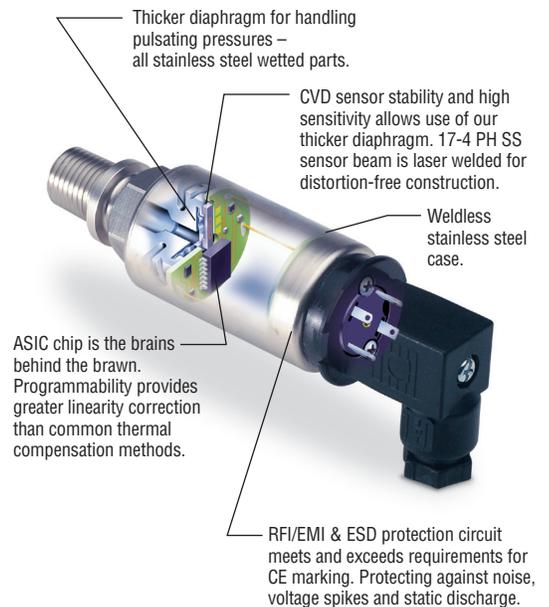
The 1200 Series features stability and toughness via its CVD and ASIC design coupled with a thicker diaphragm. The thicker diaphragm enables these sensors to survive most pressure spikes caused by pump ripple, solenoid valves, etc. The 1600 Series extends the packaging options by providing an all welded stainless steel back end for demanding industrial applications. A modular design allows special ordering of fittings, electrical cables, etc. for OEM applications. The ASIC and CVD technology enables Gems to offer almost any output over any pressure range.

Specifications

Input	
Pressure Range	Vacuum to 6000 psi (400 bar)
Proof Pressure	4 x Full Scale (FS) (<1% FS Zero Shift)
Burst Pressure	>35 x FS <= 60 psi (4 bar); >20 x FS <= 600 psi (40 bar); >5 x FS <= 6000 psi (400 bar)
Fatigue Life	Designed for more than 100 million FS cycles
Performance	
Supply Voltage Sensitivity	0.01% FS/Volt
Long Term Drift	0.2% FS/year (non-cumulative)
Accuracy	0.5% FS typical
Thermal Error	2.0% FS typical
Compensated Temperatures	-5°F to +180°F (-20°C to +80°C)
Operating Temperatures	-40°F to +260°F (-40°C to +125°C) for elec. codes A, B, C, 1 -5°F to +180°F (-20°C to +80°C) for elec. codes 2, D, G, 3 -5°F to +125°F (-20°C to +50°C) for elec. code F temperatures >100°C supply is limited to 24 VDC
Zero Tolerance	1% of span
Span Tolerance	1% of span
Response Time	0.5 ms
Mechanical Configuration	
Pressure Port	see ordering chart
Wetted Parts	17-4 PH Stainless Steel
Electrical Connection	see ordering chart
Enclosure	316 SS, 17-4 PH ss IP65 NEMA 4 for elec. codes A,B,C,D,G,1,2,3 IP67 for elec. codes F IP30 for elec. code "3" with flying leads
Vibration	70g, peak to peak sinusoidal, 5 to 2000 Hz (Random Vibration: 20 to 200 Hz @ ≈20g Peak per MIL-STD.-810E Method 514.4)
Acceleration	100g steady acceleration in any direction 0.032% FS/g for 15 psi (1 bar) range decreasing logarithmically to 0.0007% FS/g for 6000 psi (400 bar) range.
Shock	20g, 11 ms, per MIL-STD.-810E Method 516.4 Procedure I
Approvals	CE, UR (12 ET, 16 ET Intrinsically safe)
Weight	approx. 100 grams (additional; cable 75 g/m)



Along with the superiority of the CVD strain gauge, Psibar® transducers incorporate components to leverage the sensing element's strength. The output is a product with a unique balance of performance and value unmatched in today's pressure sensing market.



PRESSURE TRANSDUCERS

FOIL STRAIN GAUGE series "F"



GENERAL USE

Gauge pattern	Type	Gauge size		Backing		Resistance in Ω
		L	W	L	W	
<p>● 90° 2-element Cross (G.F. 2.1 approx.) Stacked type</p>		L : length		W : width (Unit : mm)		
 FCA-1	FCA-1-11 -17 -23	1	0.7	ϕ 4.5		120
 FCA-2	FCA-2-11 -17 -23	2	0.9	ϕ 7.0		120
 FCA-3	FCA-3-11 -17 -23	3	1.7	ϕ 11.0		120
 FCA-5	FCA-5-11 -17 -23	5	1.9	ϕ 12.0		120
 FCA-6	FCA-6-11 -17 -23	6	2.4	ϕ 14.0		120
 FCA-10	FCA-10-11 -17 -23	10	2.5	ϕ 17.0		120
	350 Ω					
	FCA-3-350-11 FCA-3-350-17 FCA-3-350-23	3	2	ϕ 11.0		350
Each package contains 10 gauges.						