

Monitoreo de Salud Estructural de Puentes Atirantados

Pablo Enrique Esteban Herrera

Trabajo de Grado para Optar el título de Especialista en Estructuras

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

Ingeniero Civil - Ph. D

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas  
Escuela de Ingeniería Civil  
Bucaramanga

2019

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de grado a mi esposa y a mi familia, quienes siempre me han apoyado en mis proyectos; los cuales con el transcurrir de los años son mensajes de motivación y superación personal en la vida familiar, y profesional.

### **Agradecimientos**

Agradezco a Dios, esta posibilidad de acrecentar mis conocimientos en beneficio de mi familia y de la sociedad que espera grandes aportes profesionales.

A la Universidad Industrial de Santander y a su Escuela de Ingeniería Civil, por el fortalecimiento en el conocimiento y nuevos aportes tecnológicos en pro de la ingeniería, con sus programas académicos de posgrado.

## Tabla de Contenido

Introducción.....	13
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos .....	15
2. Estado del Arte .....	16
2.1 Puentes Atirantados .....	16
2.2 Sistemas de Monitoreo en puentes .....	20
2.3 Estudios y experiencias internacionales en aplicaciones de Monitoreo de Puentes Atirantados.....	22
3. Instrumentación Automatizada de Puente Hisgaura.....	37
3.1 Localización y descripción del Proyecto .....	37
3.2 Línea base .....	39
3.2.1 Planos Estructurales.....	39
3.2.2 Planos Generales de Instrumentación.....	44
3.2.3 Arquitectura del Sistema de Monitoreo Puente Hisgaura .....	45
3.2.3.1 Dispositivos del Sistema Automatizado de Instrumentación. ....	45
3.2.3.1.1 Cabina Omnicab. ....	47
3.2.3.1.2 Estructura de Funcionamiento del Sistema Automatizado de Monitoreo. ....	49
3.2.3.1.3 Dispositivos instalados .....	51
3.2.4 Operación del sistema de Automatización de la Instrumentación Puente Hisgaura .....	54
3.2.4.1. Reporte de Lecturas de dispositivos de monitoreo.....	54
3.2.4.2 Visualización de lecturas relacionadas con localización de dispositivos. ....	61
3.2.4.3 Fichas Técnicas de dispositivos instalados.....	65
3.2.5. Validación Estructural. ....	69
3.2.6 Prueba de Carga Estática y Dinámica.....	69
4. Conclusiones.....	76
Referencias Bibliográficas.....	79

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Estudios AVT realizados.....	31
Tabla 2. Dispositivos de Celdas de Carga en Cables.....	51
Tabla 3. Dispositivos de Inclinómetros en Pilas.....	52
Tabla 4. Dispositivos de termómetros instalados en dovelas, cables y pilas.....	53
Tabla 5. Celdas de Carga Pila 3 en 10/10/2018.....	55
Tabla 6. Celdas de Carga Pila 3 en 10/10/2018.....	55
Tabla 7. Celdas de Carga Pila 3 en 10/10/2018.....	55
Tabla 8. Celdas de Carga Pila 3 en 10/11/2018.....	56
Tabla 9. Celdas de Carga Pila 3 en 10/11/2018.....	56
Tabla 10. Celdas de Carga Pila 3 en 10/11/2018.....	56
Tabla 11. Celdas de Carga Pila 4 en 12/10/2018.....	57
Tabla 12. Celdas de Carga Pila 4 en 12/10/2018.....	57
Tabla 13. Celdas de Carga Pila 4 en 12/10/2018.....	57
Tabla 14. Celdas de Carga Pila 4 en 24/10/2018.....	58
Tabla 15. Celdas de Carga Pila 4 en 24/10/2018.....	58
Tabla 16. Celdas de Carga Pila 4 en 24/10/2018.....	58
Tabla 17. Inclinómetros de Pila 3 en 10/10/2018 y 10/11/2018.....	59
Tabla 18. Inclinómetros de Pila 4 en 12/10/2018 y 12/11/2018.....	59
Tabla 19. Termómetros en Pila 2 en 29/09/2018.....	59
Tabla 20. Termómetros en Pila 3 en 10/10/2018.....	60
Tabla 21. Termómetros en Pila 4, tablero y cables en 10/10/2018.....	60
Tabla 22. Reportes de Inclinómetros en Pilas 3 y 4.....	61
Tabla 23. Reportes de Celdas de Carga en Cables, Termómetros en Cables y Tablero Vanos 3 y 4 de Pila 3.....	62
Tabla 24. Reportes de Celdas de Carga en Cables, Termómetros en Cables y Tablero Vanos 4 y 5 de Pila 4.....	63
Tabla 25. Reportes de Termómetros en Pilas 2, 3 y 4.....	64
Tabla 26. Estados de Carga para Prueba Estática.....	70
Tabla 27. Estados de Carga para Dinámica.....	73

**Lista de Figuras**

Figura 1. Tipos de torres en Puentes Atirantados.....	20
Figura 2. Diagrama del Sistema de Monitoreo de Salud Estructural <i>Fuente: (Wong &amp; Wong, 2007)</i> .....	23
Figura 3. Localización de la vía Curoso-Málaga.....	37
Figura 4. Planta y Elevación Puente Hisgaura.....	40
Figura 5. Sección Transversal Puente Atirantado Hisgaura.....	40
Figura 6. Pila 2 Puente Atirantado Hisgaura.....	41
Figura 7. Pilon 3 Puente Atirantado Hisgaura.....	42
Figura 8. Pilon 4 Puente Atirantado Hisgaura.....	43
Figura 9. Estribo 2 Puente Atirantado Hisgaura.....	44
Figura 10. Localización de Instrumentos Atirantado Hisgaura.....	44
Figura 11. Esquema de Conexión de Instrumentos Atirantado Hisgaura.....	45
Figura 12. Armario de Adquisición de Datos de instrumentos del Puente Atirantado Hisgaura.....	48
Figura 13. Celda de Carga para lectura de tensión en cables.....	65
Figura 14. Termómetros modelo OT3800GKA00, instalados en Pilas, Cables y Tablero.....	66
Figura 15. Ficha técnica general de Inclinómetros instalados en Pilas 3 y 4.....	67
Figura 16. Ficha técnica inclinómetros.....	68
Inclinómetro Uniaxial, modelo 05541MA0500	
Inclinómetro Biaxial, modelo 05542MA0500	

**Lista de Fotografías**

Fotografía 1. Viaducto Provincial (La Novena). Bucaramanga, Santander, Colombia. 2015.....19

Fotografía 2. Puente Hisgaura, vista costado occidental, sentido norte a sur  
(izquierda-derecha). Febrero de 2019.....38

### **Lista de Apéndices**

Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS

#### **Planos Estructurales Puente Hisgaura**

PHI-ES-A.03-PL01-V2

PHI-ES-A.04-PL05-V1

PHI-ES-E.01-PL01-V6

PHI-ES-F.01-PL01-V12

PHI-ES-G.01-PL01-V13

PHI-ES-H.01-PL03-V3

#### **Planos de Monitoreo Puente Hisgaura:**

SISLA-PE-PTEHIS-001

SISLA-PE-PTEHIS-002

#### **Planos de Pruebas de Carga Puente Hisgaura:**

DOCUMENTO EN PDF CON PLANOS:

PHI-ES-P.01-PL01-V5 Estados de Carga Estática 1 y 2

PHI-ES-P.01-PL02-V5 Estados de Carga Estática 3 y 4

PHI-ES-P.01-PL03-V5 Estados de Carga Estática 5 y 6

PHI-ES-P.01-PL04-V5 Estados de Carga Estática 7 y 8

PHI-ES-P.01-PL05-V5 Estados de Carga Estática 9 y 10

PHI-ES-P.01-PL06-V5 Estados de Carga Estática 11 y 12

PHI-ES-P.02-PL01-V4 Estados de Carga Dinámica 1 y 2

PHI-ES-P.02-PL02-V4 Estados de Carga Dinámica 3 y 4

PHI-ES-P.02-PL03-V4 Estados de Carga Dinámica 5

## RESUMEN

TÍTULO: MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL DE PUENTES ATIRANTADOS\*

AUTOR: PABLO ENRIQUE ESTEBAN HERRERA\*\*

PALABRAS CLAVE: MONITOREO DE PUENTES, MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL, LINEA BASE.

## DESCRIPCIÓN:

El monitoreo de puentes, en general, y de los puentes atirantados como obras de especial significación estructural, es de relevante aplicación dentro del ámbito de la salud estructural, para garantizar la durabilidad, confiabilidad y estabilidad de los puentes, detectando anomalías en el comportamiento de sus elementos, merced al avance tecnológico de dispositivos, de la informática y de las comunicaciones, que permiten disponer de información específica en tiempo real de los dispositivos instalados y así observar, evaluar y tomar acciones dentro de los planes de mantenimiento; a fin de garantizar la vida útil de la estructura.

Una presentación general del Estado del Arte, nos lleva a conocer las diversas tecnologías y sensores utilizados en algunos proyectos, para el control en el comportamiento estructural de los elementos y las acciones realizadas.

De manera particular se hace exposición del sistema de monitoreo instalado en el Puente Hisgaura, localizado en la vía Curos-Málaga, en el Departamento de Santander, Colombia; para el control de la salud estructural del puente atirantado de 580 m de longitud; apoyado en la definición de la Línea Base, con las Pruebas de Carga Estática y Dinámica realizadas, sus planos estructurales, el Plan de Mantenimiento, los documentos de: Arquitectura del Sistema de Monitoreo del Puente Hisgaura-San Andrés (Colombia), Manual de Operación del Sistema de Monitoreo del Puente Hisgaura-San Andrés (Colombia); como punto de partida para el control de la salud estructural del Puente Hisgaura y su aporte a la academia, contando con un sistema de monitoreo automatizado que está entregando información en tiempo real y a distancia.

---

\* Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes Ingeniero Civil- Ph. D.

**ABSTRACT**

**TITLE:** STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF CABLE STAYED BRIDGES\*

**AUTHOR:** PABLO ENRIQUE ESTEBAN HERRERA\*\*

**KEYWORDS:** MONITORING OF BRIDGES,), STRUCTURAL HEALTH MONITORING (SHM), BASE LINE.

**DESCRIPTION:**

The monitoring of bridges, in general, and cable stayed bridges as works of special structural significance, is of relevant application within the field of structural health, to guarantee the durability, reliability and stability of the bridges, detecting anomalies in the behavior of its elements, thanks to the technological advance of devices, information technology and communications, which allow specific information to be available in real time of the installed devices and thus observe, evaluate and take action within the maintenance plans,; in order to guarantee the useful life of the structure.

A general presentation of the State of the Art, take us to know the different technologies and sensors used in some projects, for the control in the structural behavior of the elements and the actions carried out.

In particular, an exhibition is made of the monitoring system installed on the Hisgaura Bridge, located on the Curoso-Málaga road, in the Department of Santander, Colombia, for the structural control of the 580 m long cable stayed bridge; supported by the definition of the Base Line, with the Static and Dynamic Load Tests carried out, its structural plans, the Maintenance Plan, the documents of: Architecture of the Bridge Monitoring System Hisgaura-San Andrés (Colombia), Operation Manual of the Hisgaura-San Andrés Bridge Monitoring System (Colombia); as a starting point for the control of the structural health of the Hisgaura Bridge and its contribution to the academy, with an automated monitoring system that is delivering information in real time and from a distance.

---

\* Bachelor thesis

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes Ingeniero Civil- Ph. D.

## Introducción

El monitoreo de puentes de manera general, está encaminado a la observación y detección de daños en la estructura, que inciden de manera inmediata, a mediano o largo plazo en la estabilidad y durabilidad de la misma, y los consiguientes resultados que afectan negativamente la competitividad de infraestructura de una región o país y por ende su economía, al requerir inversiones de restitución inmediata, para garantizar el normal desarrollo de las comunicaciones terrestres (Esteban & Marín, 2016).

Se hace relevante por consiguiente, que los puentes, siendo un rubro importante en la infraestructura del transporte terrestre, tengan un seguimiento en su salud estructural (SHM) a lo largo de su vida de servicio, atendiendo un programa general de mantenimiento y asistido mediante un sistema de monitoreo, que esté informando sobre el estado y comportamiento estructural; y así proveer acciones inmediatas o en programas de mantenimiento a fin de garantizar la durabilidad y estabilidad de la estructura (Ing. Yi Cheng Liu Kuan, Unidad de Puentes, 2014).

El monitoreo en los puentes atirantados, se hace aún más importante, en razón a la magnitud de la obra y acciones de seguimiento y mantenimiento a una estructura de grandes dimensiones, que requieren observaciones, seguimientos y detección de daños en elementos estructurales, a los cuales por la condición física de la obra no es fácil llegar a realizar una observación cercana y permanente; que requiere personal técnico y calificado que pueda trabajar en condiciones de riesgo, equipos y plataformas de trabajo especializados para estas inspecciones en particular; sea

bajo la estructura del tablero o en alturas considerables de pilas y pilonos (Ortega, López, & Velando, 2013)(Ortega et al., 2013). De otra parte, la información relacionada a carga en tirantes, inclinaciones, temperaturas, vientos, sismos y condiciones climatológicas que es posible obtener con la tecnología desarrollada aplicable a este control; constituyen las herramientas básicas para hacer el seguimiento a la salud estructural de los puentes (Olazábal Herrero Patricia, 2013).

De manera general, se hace exposición del estado del arte en la implementación de sistemas de monitoreo de puentes para el control de la salud estructural y los desarrollos de análisis estructurales, nuevos dispositivos y sistemas de información (Viloria Ramírez, 2017).

De manera particular y aprovechando la experiencia profesional del autor, se presenta el sistema de monitoreo instalado en el Puente Hisgaura, construido sobre la vía Curos-Málaga, en el Departamento de Santander, Colombia, terminado en el año 2018, cercano a la población de San Andrés, y que consiste en un puente atirantado de 580 m de longitud, conectado a dos vanos de 36,5 m de longitud, construidos en cajón multicelular de concreto fundido in situ de 1,4 m de canto; para un total de 653 m de longitud. Este sistema de monitoreo fue instalándose en su etapa constructiva, contando inicialmente con unidades de lecturas portátiles, y automatizado en su etapa final de operación con los dispositivos instalados de sensores de celdas de carga en tirantes; inclinómetros en pilas; termómetros en pilas, tablero y tirantes, con la asistencia de software especializado de gestión de datos para tener información en tiempo real según frecuencias que se definan y programen en el sistema.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Identificar las tendencias actuales en monitoreo de salud estructural de puentes atirantados.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Describir las técnicas modernas para el monitoreo de salud estructural de puentes atirantados.

Documentar como caso de estudio el Sistema de Monitoreo del puente Hisgaura, localizado en la vía Curos-Málaga.

## 2. Estado del Arte

Las aplicaciones del monitoreo para la salud estructural de puentes, han surgido de las necesidades de estudiar los casos de colapsos de estructuras de puentes importantes, tanto en etapa constructiva, como en operación y no es solo de casos particulares en nuestro país ante hechos sucedidos recientemente, sino que ha sido la experiencia de países tecnológicamente más desarrollados en la construcción de grandes puentes y estructuras colapsadas y que por lo tanto han contribuido en investigaciones e implementaciones de sistemas de monitoreo de salud estructural como lo ha sido en Corea (Chang et al., 2009)., Japón (Fujino & Siringoringo, 2011), China (Zhang & Zhou, 2007), México (Carrión Viramontes Francisco, Quintana Rodríguez Juan, López López José, Orozco Orozco Pablo, 2010), España (Olazábal Herrero Patricia, 2013).

El crecimiento sostenible, la productividad y el bienestar de una nación dependen en cierta manera de la confiabilidad y estabilidad de su infraestructura vial, entre ellas los puentes.

### 2.1 Puentes Atirantados

Los puentes atirantados son estructuras definidas estructuralmente por torres o pilones, cables y tablero, que permiten alcanzar grandes vanos y son a su vez muy flexibles e hiperestáticas, lo cual conlleva a un proceso constructivo por fases, que encierra no linealidades mecánicas y geométricas, además de los efectos reo lógicos y dificultades constructivas que puedan presentarse; que hacen del diseño de puentes atirantados y de su construcción una labor delicada,

por lo cual es conveniente realizar monitoreo de su comportamiento estructural en etapa constructiva y de operación durante su vida útil (Diego Rubio Peiroten, 2010).

El sistema resistente en un puente atirantado recae principalmente en los tirantes o cables, que le proporcionan al tablero, apoyos intermedios o pseudo apoyos verticales, e inducen fuerzas verticales en las torres, y a su vez generan fuerzas horizontales que se equilibran en el tablero porque su resultante debe ser nula, igual que en las torres (Furgang, Hernandez, 2011).

Los puentes atirantados pueden conformarse con tipologías variadas tanto en su estructura como en su forma:

- En el sentido longitudinal pueden estar conformados por dos o más torres y ser simétricos o no en los vanos, o por una sola torre donde se atiranta el vano principal y la torre puede ser tensada a un bloque de anclaje en el extremo opuesto, o autoanclarse.
- Los tirantes suelen disponerse en dos planos laterales a los bordes de tablero, o tener un plano central de tirantes.
- La disposición de tirantes puede ser en abanico con distribución radial desde la parte superior de la torre o pilón; en arpa con distribución paralela desde torre a tablero, o semiarpa, con puntos de anclaje individuales en el desarrollo de la torre a partir de determinada altura.
- Las torres o pilones pueden iniciar en los cimientos, o a partir de la altura de tablero de tal manera que el conjunto pilono, tablero y tirantes se apoya sobre pilas convencionales.
- Las torres pueden tener diferentes conformaciones geométricas, sean en forma de **A**, de **H**, de **Y** invertida, de rombo o de una sola pila (figura 1).

- El tablero puede ser en concreto postensado, metálicos y mixtos, con secciones transversales cerradas o abiertas, o de dovelas prefabricadas y postensado del proceso constructivo.
- El tablero puede estar suspendido por los tirantes, sin apoyo en las torres; o conformar una unión monolítica entre torre, dovela inicial y pilono.

Los Métodos Constructivos pueden ser por:

- Cimbrado, cuando las condiciones bajas del terreno y sus propiedades mecánicas lo permiten para apoyar el cimbrado y no existen vías vehiculares, de ferrocarril o cursos fluviales; se puede construir el tablero con cimbrado general y realizar el tesado de tirantes de forma global. Con este método se obvia la flexibilidad del tablero que genera la construcción sucesiva y los consiguientes efectos diferidos, permitiendo además reducir el número de operaciones de tesado a realizar.
- Voladizos Sucesivos, es el método de colocación de concreto in situ por dovelas sucesivas mediante carros de avance, las cuales son luego postensadas a la zona construida y atirantadas mediante cables a las torres o pilonos. Este proceso está afectado por la posibilidad de errores de ejecución y la flexibilidad del tablero y los efectos diferidos, pero es versátil en cuanto permite adaptarse a cualquier longitud de vano. Este método también puede realizarse mediante dovelas prefabricadas.
- Lanzamiento, es un proceso que de acuerdo a las facilidades de construcción en los vanos de acceso, permite una construcción industrializada del tablero metálico con mayor calidad y disminución de las desviaciones y el posterior empuje sincronizado hidráulicamente

desde los vanos de acceso al vano principal, la unión de tramos y erección de pilonos de atirantamiento, como en el caso del Viaducto Milleau en Francia.



Fotografía 1. Viaducto Provincial (La Novena) en Bucaramanga, Santander, Colombia. 2015.

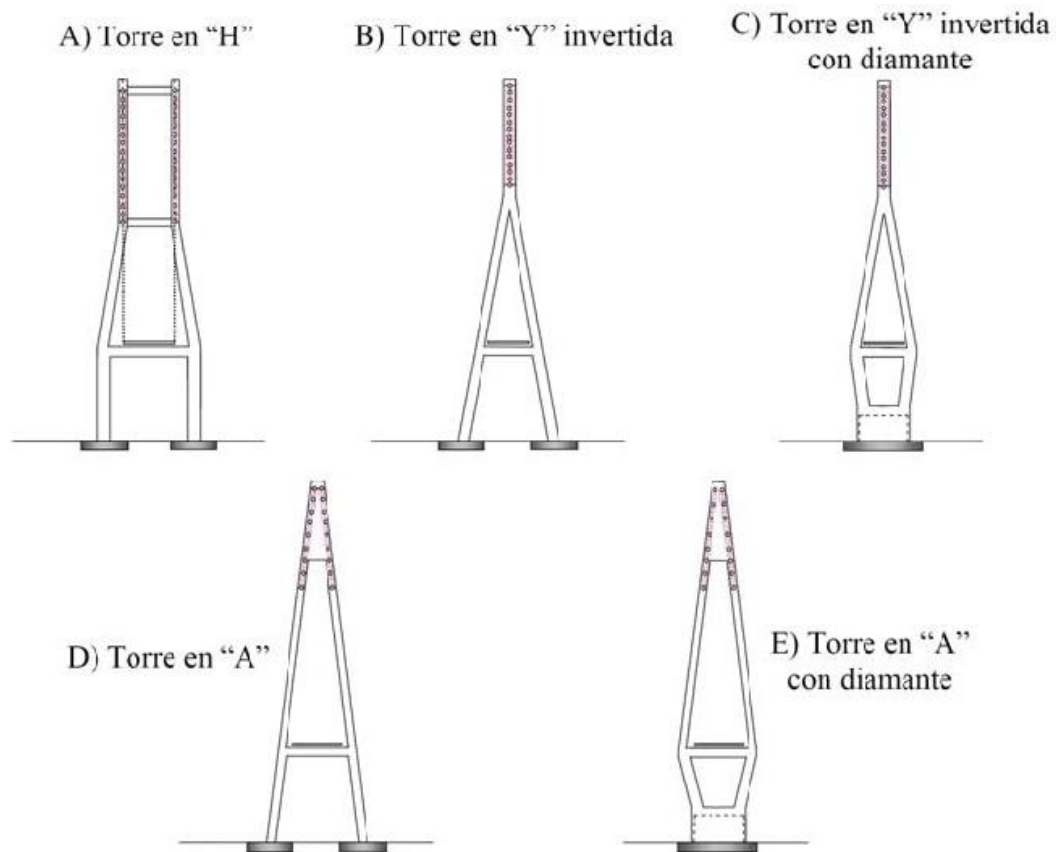


Figura 1. Tipos de torres en Puentes atirantados

Fuente: Alfredo Camara, Google Earth.

## 2.2 Sistemas de Monitoreo en puentes

De manera general para el seguimiento estructural de los puentes, se implementa la instrumentación que abarca la diversos dispositivos o sensores para medir las variaciones o comportamientos relacionados con esfuerzos en los elementos, tensión en tirantes, deformaciones y desplazamientos, vibraciones; variaciones ambientales de temperatura, humedad; vientos; sismos; cargas; que se complementan con otro tipo de sensores y métodos para hacer seguimiento a las variables físicas y químicas para medir el potencial de corrosión, presencia de cloruros, permeabilidad del concreto etc.

Esto está orientado a registrar en tiempo real las variables bajo supervisión, que permitan detectar el daño, localizarlo, cuantificarlo, generar acciones de mantenimiento y predecir la vida útil de la estructura (Viloria Ramírez, 2017).

La selección y localización de cada sensor depende de cada estructura, de los elementos que se requieran controlar, su ubicación y accesibilidad y hasta del presupuesto de inversión del proyecto, para lo cual se tiene una amplia técnica de supervisión a distancia o presencial con los siguientes tipos de sensores:

**Para incidencia ambiental:**

Sismo: acelerómetros

Sensor de temperatura

Sensor de humedad

Anemómetro: dirección y velocidad del viento

**Para incidencia estructural:**

Medición de vibraciones verticales: acelerómetros

Medición de vibraciones horizontales: acelerómetros

Desplazamientos verticales: inclinómetros

Tensión en tirantes: celdas de carga

Extensómetro de abertura de junta vibrante (jointmeter): desplazamiento

Esfuerzos y deformaciones: sensores de fibra óptica FOS

**Soporte de adquisición y procesamiento de datos:**

Sistema alámbrico

Sistema inalámbrico

Presencial adquisición de datos

Registro y transmisión de datos en tiempo real vía internet.

Software de adquisición y procesamiento de datos

**2.3 Estudios y experiencias internacionales en aplicaciones de Monitoreo de Puentes Atirantados.**

Japón es una nación sujeta a adversidades naturales por su entorno ambiental, por lo cual es propenso a desastres naturales, situaciones que condicionaron la urgente necesidad de monitorear sus puentes. Debido a la cantidad de puentes construidos en Japón, el monitoreo de puentes se ha llevado a una eficiente gestión de existencias, propendiendo por la reducción de riesgos para mejorar la seguridad del puente y se implementan tecnologías de monitoreo de riesgo y de vulnerabilidad (Fujino & Siringoringo, 2011).

La experiencia en sistema de monitoreo de salud estructural en Hong Kong, China implementado en los puentes Tsing Ma, y Kap Shui Mun, tienen gran significancia en su concepto modular bajo el concepto mejorado de seis módulos integrados en términos de su rendimiento funcional. “Los seis módulos integrados son: 1- el sistema sensorial, 2- el sistema de adquisición y transmisión de datos, 3- el sistema de control y procesamiento de datos, 4- el sistema de evaluación de salud estructural, 5-el sistema de inspección y mantenimiento y 6- el sistema de

gestión de datos de salud estructural.” El sistema debe “al menos monitorear la carga y los parámetros estructurales establecidos por el diseñador del puente para que el rendimiento del puente en las condiciones de carga actuales y futuras pueda evaluarse”. La evaluación de dichos resultados debe facilitar las actividades de inspección de puentes y determinar la causa del daño y el alcance de la reparación (Wong & Wong, 2007).

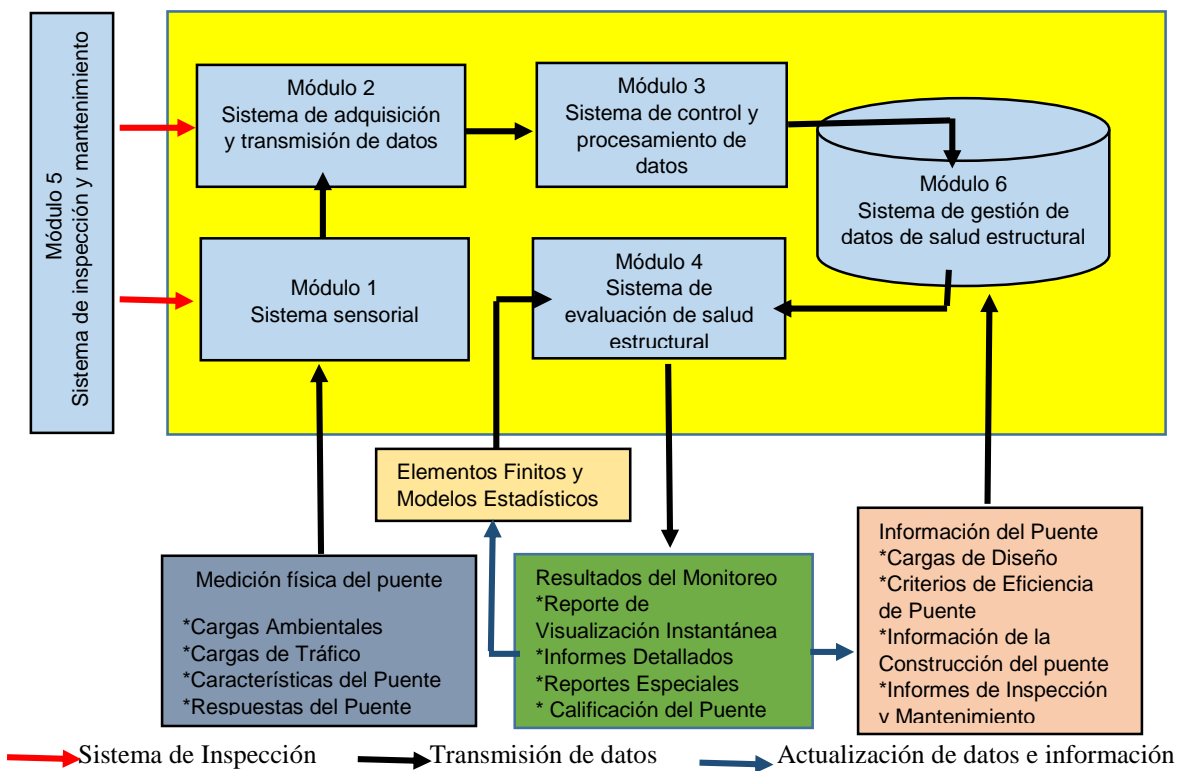


Figura 2. Diagrama del Sistema de Monitoreo de Salud Estructural

Nota: (Wong & Wong, 2007). adaptado por el autor.

El propósito de aplicar sistemas de monitoreo para la salud estructural es el de obtener un conocimiento completo en tiempo real de la condición estructural y que el daño en una etapa temprana se detecte con la información monitoreada. De acuerdo a investigaciones realizadas en China, el rendimiento de la tecnología de salud estructural no ha sido evaluado en la práctica. En

la investigación sobre defectos encontrados en 16 puentes atirantados y confrontados con un diseño teórico de puente atirantado y un supuesto de escenarios de daños, se analizan cambios en la deformación y distribución de tensiones, así como características dinámicas del puente debido al daño (Zhang & Zhou, 2007).

El estudio establece que es difícil encontrar un daño prematuro a partir de los datos monitoreados y que es importante medir las condiciones ambientales de temperatura y velocidad del viento para observar el comportamiento de las estructuras por estos factores. Observan que las mediciones de las técnicas de monitoreo son bajas, dificultando la detección de pequeños cambios en el daño. De otra parte la premisa que el daño cambia la rigidez de la estructura, la cual está relacionada con la deflexión y la vibración y en muchos casos hay gran diferencia entre rigidez e integridad, además, por ejemplo la corrosión progresiva de los cables y el refuerzo dentro del concreto son difíciles de identificar por los cambios de rigidez. La rigidez de una estructura cambia significativamente con la presencia de un daño peligroso y la tecnología actual de monitoreo es limitada en términos de deterioro estructural y se espera un gran avance en el desarrollo de sistema de monitoreo avanzados (Zhang & Zhou, 2007).

Otro plan de investigación lo ha desarrollado la Universidad Politécnica de Hong Kong, tomando como ejemplo el puente atirantado Ting Kau, instrumentado, orientado hacia “un sistema de índice de sistema de base de datos, para el monitoreo de gestión de datos, el modelado de la variabilidad ambiental de las propiedades modales, con el fin de eliminar los efectos ambientales en la vibración, basada en la detección de daños y la posibilidad de utilizar propiedades modales medidas en los sensores de vibración implantados para la detección de daños”. Concluyen que el

monitoreo basado en instrumentación es ampliamente aceptado y que el hardware actual permite la adquisición eficiente de datos, pero que falta capacidad para administrar, analizar y comprender los datos masivos para monitorear la salud estructural de los puentes. El monitoreo basado en instrumentación ha sido una tecnología ampliamente aceptada para diagnosticar y evaluar la salud estructural y las condiciones de los puentes a gran escala (Ko et al., 2009).

Análisis de confiabilidad basado en el monitoreo de la salud estructural, son objeto de estudio teniendo en cuenta que “la seguridad y la capacidad de servicio de los puentes de gran envergadura son preocupaciones importantes de las administraciones de carreteras en todo el mundo”. “Es conocido que los datos de monitoreo en tiempo real pueden ayudar a los investigadores a comprender el comportamiento real de una estructura. Sin embargo, actualmente una brecha entre la tecnología de monitoreo de salud y la inspección, mantenimiento y administración de puentes, evita que las administraciones de carreteras experimenten los beneficios del monitoreo”. “Las administraciones de carreteras necesitan con urgencia una respuesta a los problemas de servicio y seguridad en forma de datos de SHM, lo que ayudaría a asignar recursos para la inspección, el mantenimiento y la rehabilitación de puentes” (Li, Li, Ou, & Li, 2012).

En Corea una serie de colapsos de puentes, originó un sistema de monitoreo de puentes de primera generación, para la reconstrucción del puente New Haengiu, colapsado durante su construcción en 1995. Una segunda generación del sistema de monitoreo fue considerada para monitorear las deformaciones en la sección de máximo momento positivo, movimiento de las juntas de expansión, temperatura, inclinación de pilas, tensión en cables, la vibración del tablero como respuestas usuales del comportamiento del puente, y se investigan los estudios asociados y

actuales en curso y las limitaciones de las tecnologías contemporáneas para posibles soluciones correctivas de un sistema de monitoreo de puente (Chang et al., 2009)

El desarrollo en detección inteligente Inalámbrica y técnicas de evaluación para estructuras civiles para el monitoreo de salud estructural, contempla actualmente tres tipos de tecnologías:

“SHM basada en sensores de aceleración inalámbrica, SHM basada en impedancia inalámbrica y una técnica de detección y actuación sin contacto basada en óptica”.

El SHM basado en vibración, utiliza una red de sensores de vibración inalámbricos. La identificación modal del puente y la tensión en el cable se realiza en base a los datos de aceleración ambiental.

“En segundo lugar el SHM basado en impedancia que utiliza sensores piezoléctricos activos se presenta centrándose en los problemas de hardware y software”.

“En tercer lugar se presenta un método inalámbrico de transmisión de datos y energía mediante láser y tecnologías optoelectrónicas para la medición sin contacto de las ondas guiadas y la impedancia y la detección de daños posterior”.

El objetivo de la instrumentación inalámbrica es en esencia el menor costo y tiempo de implementación del sistema de monitoreo (Chung-Bang Yun, Soojin Cho, Hyun-Jun Park, 2014)

Otro ejemplo de aplicación de sensores inalámbricos para el monitoreo de vibraciones en puentes, se presenta con el puente atirantado Hwamyung en Corea, con una red de sensores inalámbricos y plataforma Imote 2; en que el tiempo de instalación y el de implementación del sistema de monitoreo se reducen con esta tecnología (Nguyen, Kim, & Park, 2013).

El uso de sensores de fibra óptica SOFO, en monitoreo estático y dinámico se ha instalado en etapa constructiva para control de fases significativas en un puente atirantado en Venecia y en etapa de operación, los sensores de deformación lineal y sus localizaciones se seleccionaron para permitir mediciones dinámicas periódicas de la estructura (Del Grosso, Torre, Inaudi, Brunetti, & Pietrogrande, 2006).

Un análisis de plataformas y sensores remotos sin cable es presentado por el Laboratorio de Ingeniería Estructural Newmark (NSEL) del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, para profundizar en el sistema de monitoreo usando sensores inalámbricos inteligentes (Wireless Smart Sensors), (Jang & University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010).

Los desarrollos en dispositivos y comunicaciones son de gran expectativa en el monitoreo inalámbrico de la salud estructural, dando lugar a herramientas más económicas y potentes en el procesamiento inalámbrico (Swartz & Lynch, 2009).

En el entorno latinoamericano se tiene el puente atirantado del río Papaloapan en México, construido en 1994 y puesto en servicio en el año 1995. Con un vano principal de 203 m y longitud total de 407,21 metros, el puente de 112 cables distribuidos en 8 semiarpas de 14 cables, sufrió una falla repentina de desprendimiento de uno de sus cables, lo cual generó una deflexión en el claro principal. Estudios dictaminaron un problema de fundición de un anclaje por un tratamiento térmico posterior, pero a la vez se detectaron problemas similares en 16 elementos superiores de anclaje. Este puente está monitoreado en tiempo real y permanente por el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México, dada la importancia en la economía del país debido a que es la vía principal de comercio entre el centro y sureste del país (Juan Antonio Quintana Rodríguez<sup>1</sup>, 2014). La instrumentación instalada durante su rehabilitación, fue importante para vigilar el comportamiento del puente en sus fases de reparación, dado que fue necesario sustituir 20 elementos de anclaje superior en 20 cables, requiriendo el destensado de los mismos; por lo cual la estructura se sometía a condiciones extraordinarias de cargas. Las acciones de liberar carga muerta para la sustitución simultánea de 2 tirantes hizo necesario un programa de monitoreo de tensión sobre los tirantes, para no exceder los límites de tensión de diseño (Carrión Viramontes Francisco, Quintana Rodríguez Juan, López López José, Orozco Orozco Pablo, 2010).

El Instituto Mexicano del Transporte, IMT, estudió una metodología para la implementación de protocolos de actuación ante eventos que se manifiesten en una actuación atípica en el comportamiento de los puentes o degeneren su condición estructural. Mediante un Sistema Inteligente de Monitoreo SIM, se realiza la evaluación del comportamiento estructural que permite el seguimiento a los eventos que generan una respuesta anormal de la estructura en coordinación con las autoridades encargadas del mantenimiento de los puentes y de la seguridad de los usuarios. El Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes CMPEI tiene a su cargo la evaluación de los puentes mexicanos instrumentados por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte CST; y para cumplir ese objetivo es importante contar con la información en tiempo real de la información de los sensores instalados, que lo realiza La plataforma del SIM, dedicada a la gestión automática de los datos en el monitoreo remoto de estructuras.

La Secretaría de Comunicaciones y Transporte SCT cuenta con el Sistema de Puentes de México SIPUMEX, para la conservación de la infraestructura a partir de una calificación otorgada por técnicos especializados que realizan inspecciones visuales a los puentes; herramienta que puede ser mejorada con el sistema de monitoreo que no pueden ser detectados por inspecciones visuales. La metodología propuesta fue implementada en el puente del río Papaloapan y que se pretende sea implementada en los demás puentes instrumentados en México, constituyen un punto de referencia en la armonización de la instrumentación de puentes que se está haciendo en Colombia, con el Sistema de Administración de Puentes de Colombia, Sipucol (Antonio & Rodríguez, 2016).

El Puente atirantado República Federal en Ciudad de México, sufrió daños en vigas principales y secundarias en el tablero, a raíz del sismo de 7,4 grados del 12 de marzo de 2012. El tablero fue sometido a fuerzas de compresión que indujeron pandeo local de los patines del puente. No colapsó, tratándose de una estructura metálica, lo cual permitió su reconstrucción. En lo concerniente al monitoreo de la salud estructural, deben monitorearse los asentamientos que ejercen la influencia del suelo, nivelación topográfica de apoyos y trabes, control de vaina de polietileno de cables, corrosión, inspección de la cimentación de los apoyos. Aunque no se establece un monitoreo con sensores, la salud estructural requiere este seguimiento por lo menos de manera anual, a fin de garantizar su durabilidad (Guerrero Puente César Alejandro, 2012).

El IMT de México realizó un estudio experimental en un puente de 112 tirantes y se compararon con un modelo de aproximación lineal los datos de las pruebas de carga y los datos de diseño. En resumen la evaluación de la medición de tensiones por vibraciones y el procedimiento experimental son más simples de realizarse y en menor tiempo que las pruebas de carga (Carrión, José, Hernández Jiménez, & Guillén, 2005).

Siendo el concreto uno de los materiales de mayor uso en la construcción de las estructuras, se resalta la importancia de la durabilidad del concreto a fin de garantizar la vida útil de las estructuras y que la tendencia es mejorar el control de calidad a través de un monitoreo continuo de la estructura. Un concreto de mayor durabilidad es básico en el desarrollo de políticas de economía del mundo, ante la afectación de recursos ambientales, económicos, por lo que se reafirma la necesidad de proveer un concreto con tecnología adecuada y soportada con un conocimiento

científico (Hernández-Castañeda & Mendoza-Escobedo, 2018). (Hernández-Castañeda & Mendoza-Escobedo, 2018).

Los sistemas de monitoreo con sensores de fibra óptica (Fiber Bragg Grating, FBG), han sido aplicado en el monitoreo de salud estructural en puentes en un campo de acción de pruebas no destructivas, estáticas y dinámicas con mediciones de deformación, desplazamiento, deflexión, temperatura y vibraciones. El hecho de no utilizar un medio conductor, eléctricamente pasivo a interferencia electromagnética EMI, permite realizar mediciones a través de largas distancias sin disminución de la calidad de señal y permite la conexión de múltiples sensores en una sola fibra óptica y resultan comparativamente prácticos y ventajosos de implementar respecto a sensores eléctricos convencionales cuando se requiere una cantidad considerable de sensores. (Navarro-henríquez, 2014).

El interés en la conservación de la infraestructura vial, en especial de puentes, el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, en el Programa de Infraestructura de Transporte, PITRA, de Costa Rica, presenta una revisión concerniente al monitoreo de salud estructural para instrumentación de puentes, describiendo las plataformas tecnológicas a fin de hacer recomendaciones estratégicas para diagnóstico y evaluación de puentes (Kuan, 2013).

En Perú se realizó la evaluación de frecuencias naturales y modos de vibración del Puente Atirantado Rayitos de Sol de un modelo tridimensional de elementos finitos y la medición de vibraciones ambientales del puente, observando que “los resultados numéricos y experimentales

obtenidos coinciden de forma aceptable cuando en el modelamiento se adoptan las condiciones de contorno adecuadas en las juntas de expansión y se consideran las rigideces elásticas efectivas de los elementos de concreto armado” (Julio A. León Deza (P), 2018).

A nivel nacional se han realizado algunas experiencias en monitoreos relacionados con la salud estructural de puentes, como el desarrollado por la Universidad Industrial de Santander, UIS en el puente Gómez Ortiz, por medio de las propiedades dinámicas de la estructura (Viviescas Jaimes, Carrillo León, & Vargas Carvajal, 2018).

La Universidad del Valle realizó un monitoreo en el puente El Hormiguero, sobre el río Cauca, basado en los cambios en las frecuencias naturales y modos de vibración del puente y comparaciones con un modelo analítico, para la detección de daños (Thomson, Ph, D, & Valle, 2000).

En convenio con el Instituto Nacional de Vías, INVIAS, la Universidad Javeriana y la compañía de ingeniería Icagel, se realizó un estudio de vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga al Viaducto Cesar Gaviria Trujillo localizado en la ciudad de Pereira, Colombia, empleando técnicas de confiabilidad estructural y basado en monitoreo por instrumentación. Se hicieron ensayos geofísicos, ensayos de las propiedades mecánicas de materiales, vibraciones ambientales, medición de los efectos de la cargas vehiculares, instrumentación inalámbrica, pruebas de carga, medición de tensiones de tirantes, etc. En base a las pruebas de carga estática y dinámica, fueron calibrados los modelos estructurales elaborados por elemento finitos. Los análisis de confiabilidad sobre un estudio de amenaza sísmica y respuesta dinámica del sitio del puente, generaron nueve

espectros de respuesta con diferentes periodos de retorno. El análisis de las curvas de probabilidad de resistencia y sollicitaciones sísmicas de los pilones, mostraron índices de confiabilidad adecuados dentro de las recomendaciones de las normas internacionales. Uno de los elementos de la superestructura instrumentada para evaluar su capacidad para los efectos de tráfico, presentó un índice de confiabilidad por fuera de los rangos sugeridos por las normas internacionales; y algunos tirantes presentan niveles de tensiones mayores a las admisibles especificadas.

El estudio determina que uno de cinco elementos monitoreados tiene una probabilidad de falla mayor que la especificada por la norma europea y americana; esto es, que la viga de arranque del pilote de Dosquebradas, tendría niveles de esfuerzos mayores de momentos negativos a flexión generados por la carga de tráfico de camión C40-95, por lo cual debe ser tenida en cuenta esta condición en trabajos de rehabilitación, y su riesgo es moderado.

Los análisis de los nueve espectros en diferentes períodos de retorno, demuestran los pilonos tienen una capacidad estructural satisfactoria y que las probabilidades de falla están por debajo de las permitidas en el código europeo ( $P_f = 0,0001$ ) y el código americano ( $P_f = 0,001$ ).

Se encontró que el 40% de los cables tienen tensiones mayores a las permitidas en la norma de POST TENSIONING INSTITUTE – PTI, con relaciones de tensión variando entre el 0,35 y 0,55 Fpu, y en algunos casos superior a la tensión admisible 0,45 Fpu.

Los resultados del estudio fueron del conocimiento de INVIAS y de Icagel, para diagnóstico, mantenimientos, actualización y rehabilitación del viaducto (Muñoz, Nunez, Rodríguez, Ramos, & Otálora, 2010).

Se cuenta también con la experiencia del seguimiento a la redistribución de esfuerzos en los elementos losa, tirantes y pilón del puente Gilberto Echeverry 4 Sur en Medellín, Colombia, debido a los cambios en los estados de tensiones de los cables, haciendo mediciones de vibraciones en cables y obteniendo información de monitoreo con celdas de carga. El puente está constituido por un tablero de 40,5 m de ancho, un vano central de 108 m y dos vanos laterales de 53 m, soportado por 51 cables y dos pilonos de 37 m de altura. En su etapa constructiva se instalaron 12 celdas de carga, cuyas mediciones históricas fueron cotejadas con mediciones de vibración en cables mediante acelerógrafos para el estudio y calibración del modelo estructural.(CAICEDO, 2014).

Disertación sobre el Estado del Arte en Monitorización de Salud Estructural, basado en Agentes Inteligentes, resalta que un “aporte importante al estado del arte, es encontrar una arquitectura multiagente apropiada para la monitorización de la salud estructural de cualquier estructura” (Felipe, Parra, & Mejía, 2010).

Un estudio de detección de daños en puentes de concreto reforzado utilizó como base el camión C40-95 del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, realizando mediciones de vibraciones, cuyos datos de vibración obtenidos fueron utilizados para validar los modelos de

predicción de daño AR-ARX y demostrar el rendimiento de los algoritmos para detectar daño estructural (Luis, Ospina, Alberto, & Jerez, 2013).

Considerando que en la salud estructural de puentes debe partirse con una línea base que involucre las pruebas de carga y dinámica, es importante resaltar los estudios realizados en una propuesta de tesis de grado, para evaluar la capacidad de carga en tableros de concreto reforzado, en base al eurocodigo y la norma española (Mateo López Lara tito, 2015).

Contribuciones al análisis de las propiedades estructurales, para el diseño, construcción y mantenimiento de estructuras especiales como los puentes, que requieren desarrollar pruebas para identificar sus propiedades, se han realizado sobre métodos de excitaciones debidas a vibraciones ambientales (AVT) de vientos, tráfico, microsismos, en beneficio a la dificultad de realizar pruebas de vibración o excitación forzada (FVT). Según los estudios, las pruebas de Vibraciones Ambientales AVT, han demostrado buen desempeño en los puentes a nivel nacional e internacional, siendo comparativamente más económica al no requerir de excitación artificial, necesaria en los métodos que utilizan vibraciones inducidas (FVT). Se pueden desarrollar sin interrumpir el uso normal de la estructura y el uso de las vibraciones ambientales en el desarrollo del monitoreo en tiempo real es atractivo en la excitación de la estructura.

Tabla 1

*Estudios AVT realizados*

<b>ESTRUCTURA</b>	<b>AUTORES DE ESTUDIO</b>	<b>ALCANCE DE ESTUDIO</b>
Puente Río Cumberland L: 509 m; 6 luces	Wei-Xin Ren, Wael Zatar, Issam E. Harik	Pruebas de vibraciones ambientales. Modelamiento en FE. Selección del movimientos sísmico, Time History Análisis. Evaluación de la seguridad sísmica del puente.
Puente Peatonal Morca	C. Gentile, N. Gallino	Configuración deformada por acción de cargas muertas. AVT, excitado por paso de peatones y vientos. Extracción de parámetros modales. Pruebas de carga estática
Puente atirantado Qingzhou en Fuzhou China Luz principal 605 m.	Wei-Xin Ren., Xue-Lin Penga and You-Qin Lina	AVT sobre placa y cables. Parámetros modales por el método Peak Picking. Correlación entre el modelo de elementos finitos y las ambientales.
Puentes Marga-Marga, Amolanas y el viaducto del Metro de Santiago, en Chile	M. O. Moroni, and M. Sarrazin	Instrumentados con acelerógrafos, en los cuales a partir de las mediciones de vibración ambiental, se corrobora la acción positiva de los sistemas de aislamiento horizontal con la reducción del movimiento.
Puente El Hormiguero, Colombia.	P. Thomson, J. Marulanda C. and J. Marulanda A.	Acelerómetro uniaxial, amplificador y transmisor de radio construido en Universidad del Valle. Se implementó sistema de identificación de daño Nivel I, basado en cambio de frecuencias naturales, mediante comparaciones con un modelo analítico.
Viaducto Dos Quebradas, Colombia.	P. Thomson, N. Galindez, J. Marulanda, A. Orozco, J. Caicedo.	Planteamiento de sistema de alerta de fallas, construcción de modelo analítico de la estructura, diseño de software para alerta de fallas en elementos estructurales, identificación de daños Nivel II y Nivel III.

(Gómez Araujo, Maldonado, &amp; Chio Cho, 2010).

### 3. Instrumentación Automatizada de Puente Hisgaura

#### 3.1 Localización y descripción del Proyecto

La vía nacional Curos –Málaga, conecta la troncal Tunja-Bucaramanga con la Troncal Central del Norte Duitama-Pamplona, entre el sitio conocido como Los Curos y la ciudad de Málaga en el departamento de Santander. El puente Hisgaura de 653 m de longitud, se localiza entre los PR 45+630 a 46 + 805, cerca de la población de San Andrés situada en el PR 51+000.



Figura 3. Localización de la vía Curos-Málaga

Fuente: <http://www.invias.gov.co>

Nota: Información del Vol\_XV\_Informe Final Ejecutivo, Consorcio DIS SA – EDL LTDA.

**ESTUDIOS Y DISEÑOS A NIVEL FASE III PARA LOS SITIOS CRÍTICOS Y PUENTES DE LA CARRETERA MÁLAGA-LOS CUROS ENTRE EL PR 0+000 AL PR 113+000 TRAMO PR 45+630-PR 46+805.**



Fotografía 2. Puente Hisgaura, vista costado occidental, sentido norte a sur ((izquierda-derecha). Febrero de 2019.

El Puente Hisgaura está conformado por dos tipologías de puente: dos (2) vanos de losa aligerada de 36,5 m, de longitud, de 1,40 m de canto con cinco (5) vigas postensadas apoyados sobre estribo 1 y pilas 1 y 2, conectando el acceso sur con un puente atirantado de tres (3) vanos de 125 m, 330 m y 125 m para una longitud de 580 m, con retenidas en pila 2 y estribo 2 y apoyado en pilas centrales 3 y 4; que conecta al acceso norte, para una longitud total de 653 m.

El tablero con un ancho total de 13,7 m, tiene una sección de 1,4 m de canto en sus dos nervios postensados laterales y una losa intermedia de 25 cm de espesor entre ellos, con un contrapeso y su retenida en el estribo 2 (acceso norte) y la retenida en la pila 2 por el acceso sur. Los tirantes

están distanciados cada 10.0 m, y longitudinalmente tiene cada 5.0 m tabiques transversales postensados de 0,3 m de espesor.

La sección transversal del tablero con un ancho de 13,70 m, permite la disposición de dos carriles vehiculares de 3,65 m, bermas laterales de 0,50 m, bordillo y baranda de protección vehicular, paso peatonal en ambos costados y barrera de protección peatonal en los bordes. Las secciones cada 10 m, contemplan los macizos de anclaje activo de tirantes bajo el tablero y riostras transversales cada 5 m entre los nervios postensados del tablero.

### **3.2 Línea base**

**3.2.1 Planos Estructurales.** De manera esquemática, se adjuntan los planos básicos del puente, el cual fue objeto de instalación del sistema automatizado de la instrumentación, localizando un inclinómetro uniaxial y un biaxial en pila 3 y pila 4; 8 termómetros en tablero, 10 termómetros en tirantes, 2 termómetros en pila 2, 3 en pila 3, 3 en pila 4 y 32 celdas de carga en tirantes dispuestos de manera triangular a lo largo del tablero, para dar cobertura a la totalidad de 128 tirantes del puente.

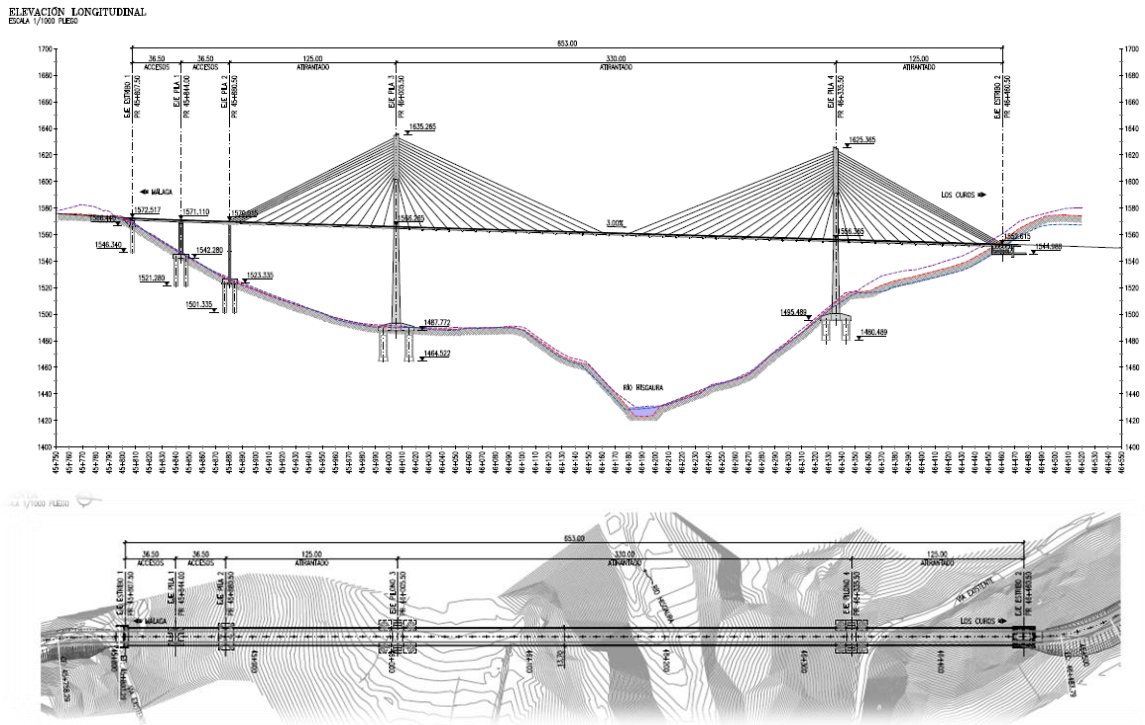


Figura 4. Planta y Elevación Puentes Atirantados Hisgaura  
Fuente: Plano PHI-ES-A-03-PL-01-V2, Sacyr

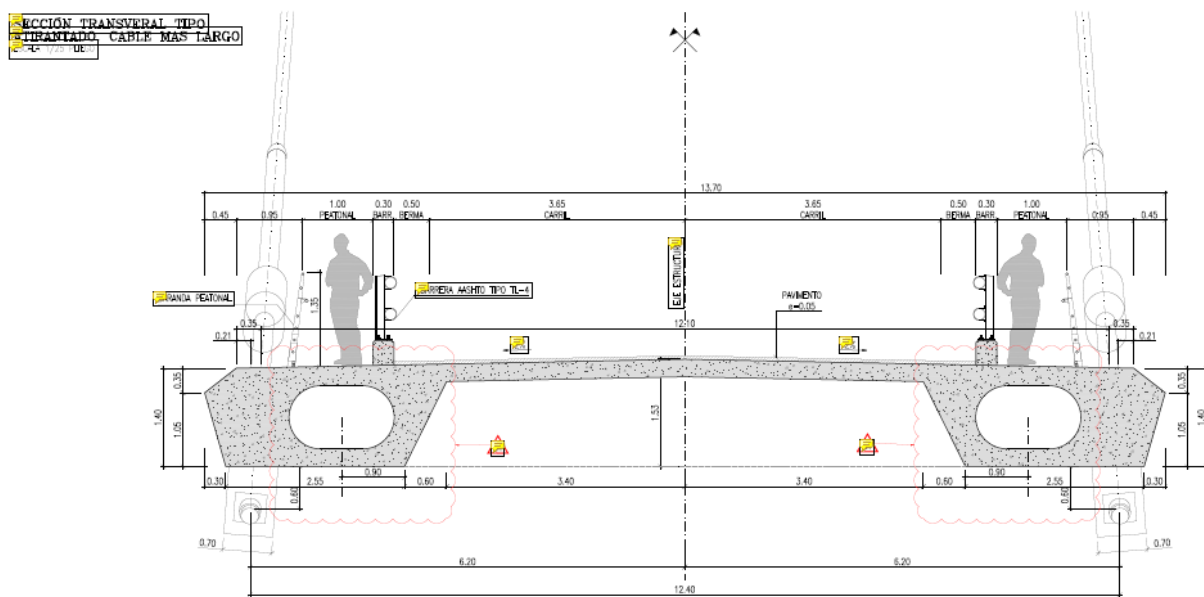


Figura 5. Sección Transversal Puentes Atirantados Hisgaura  
Fuente: Plano PHI-ES-A-04-PL-05-V1, Sacyr

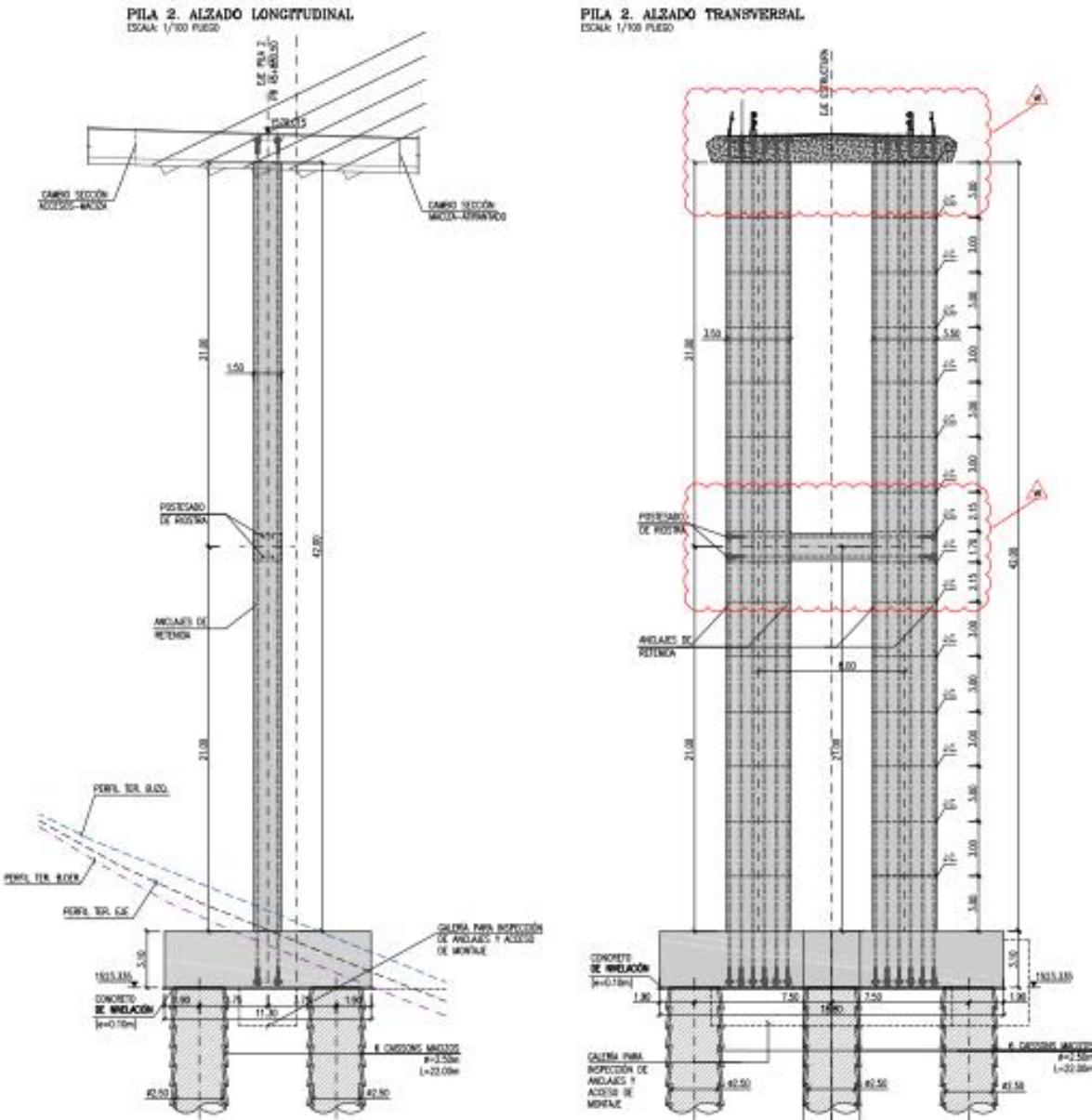


Figura 6. Pila 2 Puente Atirantado Hisgaura  
Fuente: Plano PHI-ES-E-01-PL-01-V6, Sacyr.

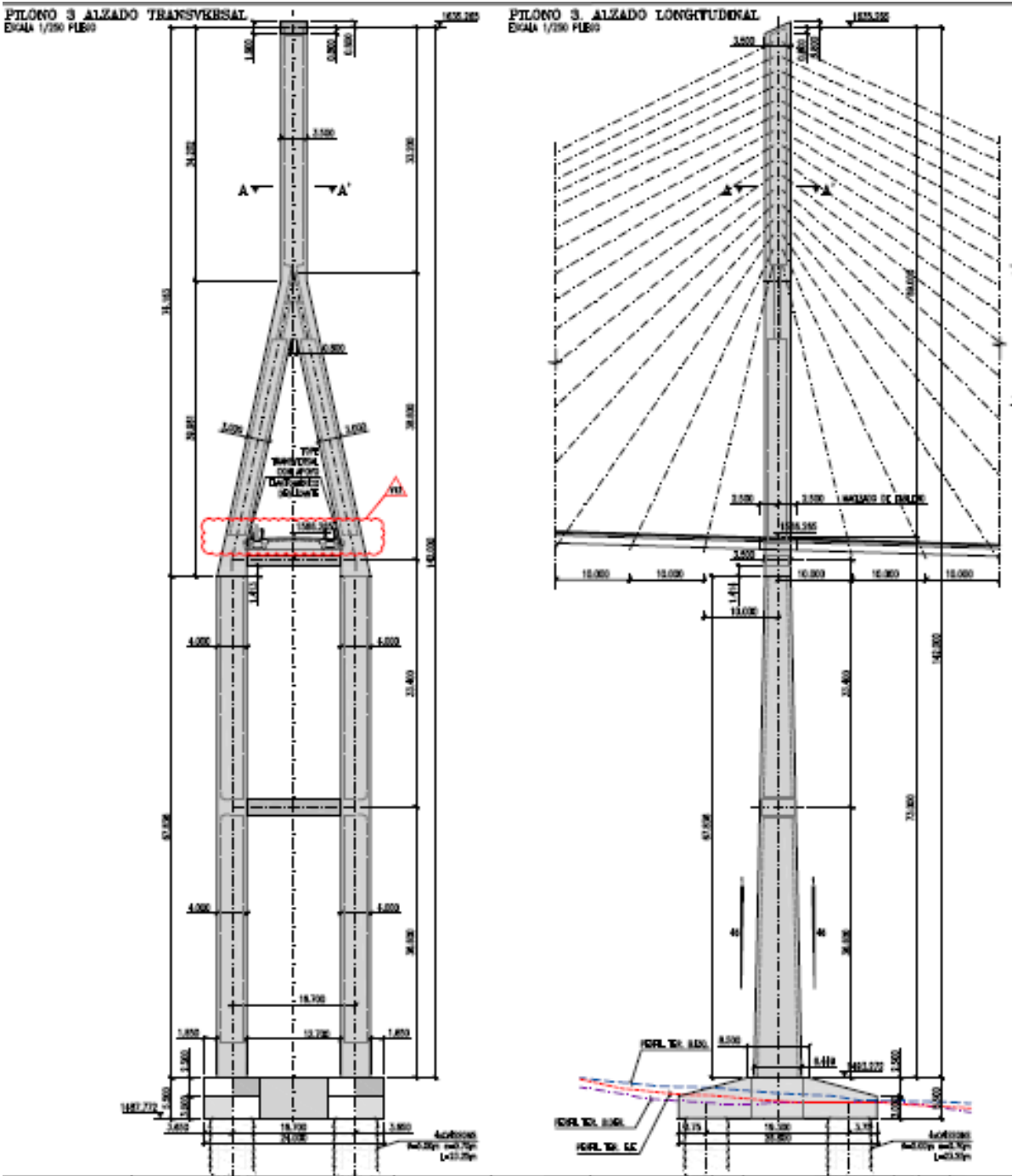
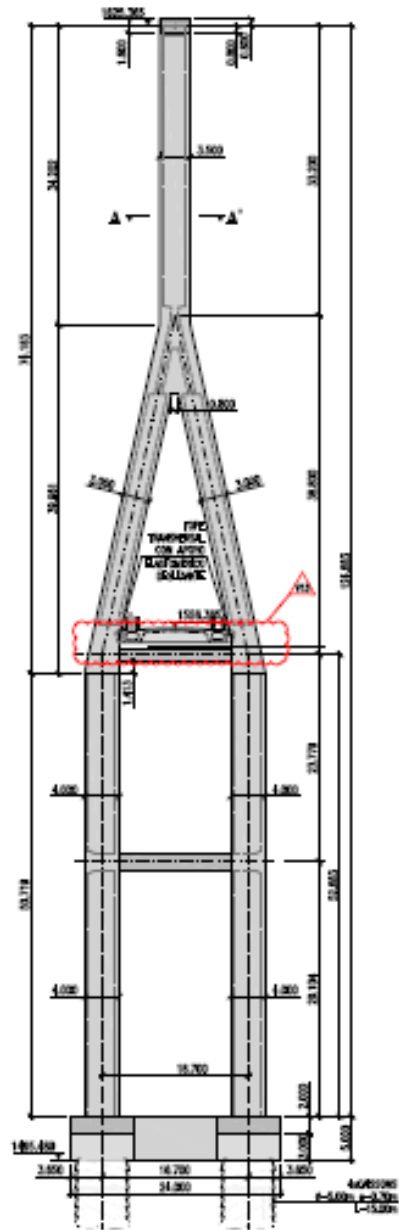


Figura 7. Pylon 3 Puente Atirantado Hisgaura  
Fuente: Plano PHI-ES-F-01-PL-01-V12, Sacyr.

PILONO 4 ALZADO TRANSVERSAL  
Escala 1/200 P.B.00



PILONO 4 ALZADO LONGITUDINAL  
Escala 1/200 P.B.00

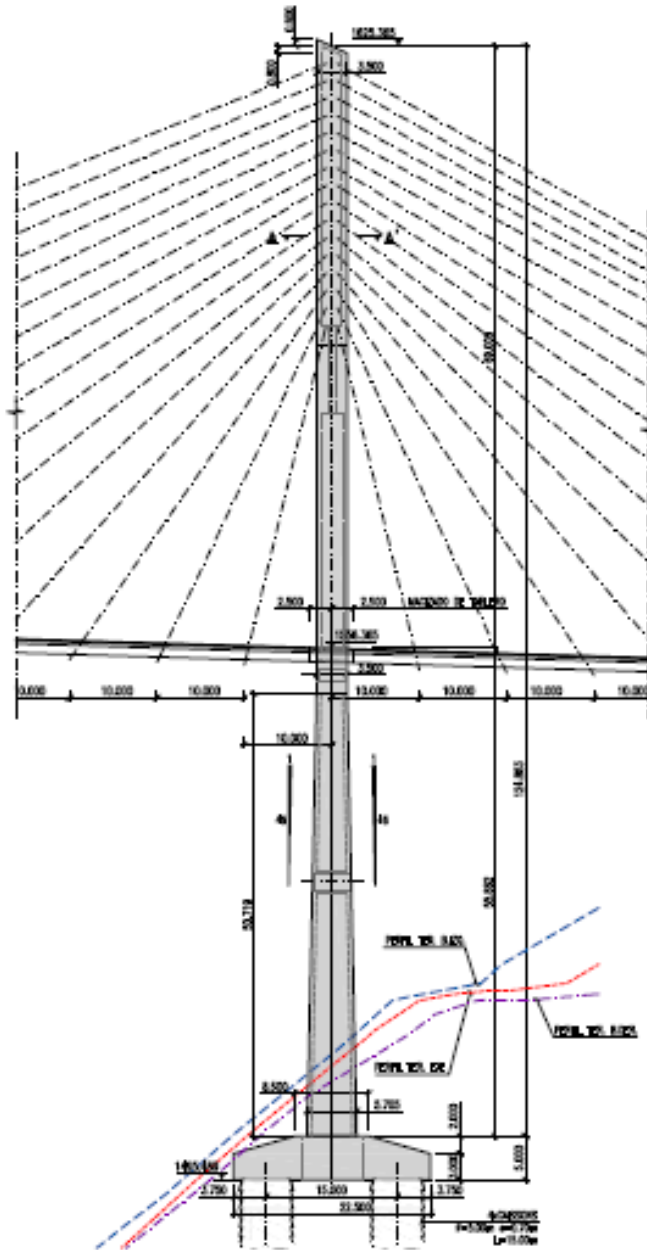


Figura 8. Pilon 4 Puente Atirantado Hisgaura  
Fuente: Plano PHI-ES-G-01-PL-01-V13, Sacyr.



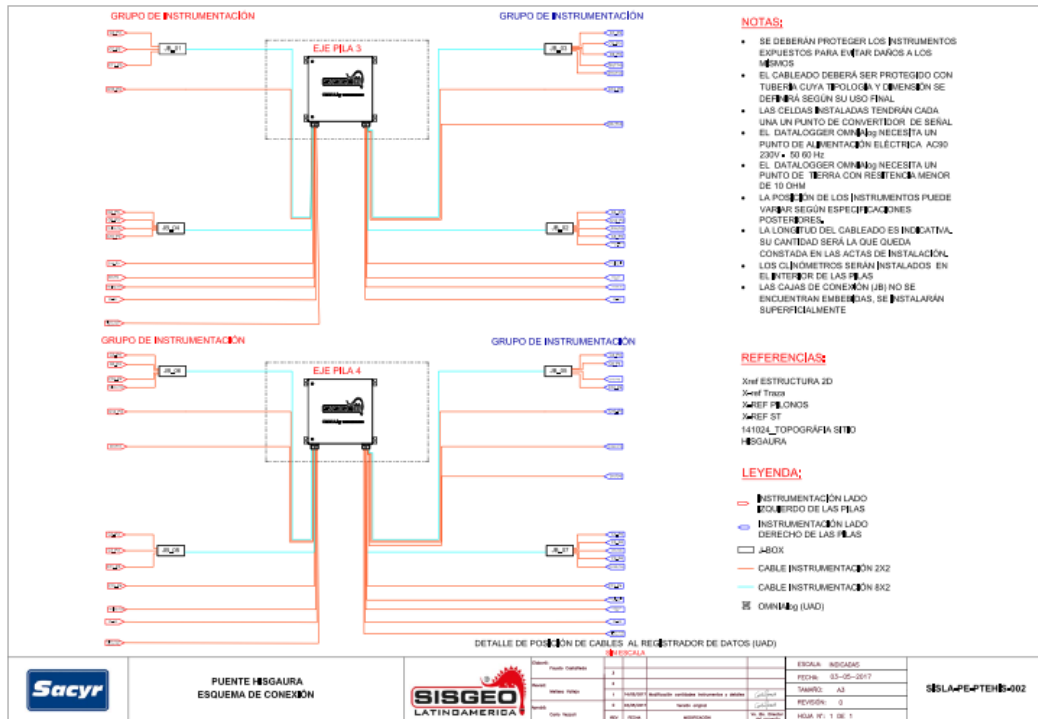


Figura 11. Esquema de Conexión de Instrumentos Atirantado Hisgaura

Fuente: Plano SISLA-PE-PTEHIS-002, Sacyr-Sisgeo.

### 3.2.3 Arquitectura del Sistema de Monitoreo Puente Hisgaura.

La empresa SISGEO LATINOAMERICA, implementó el Sistema de Monitoreo Automatizado del Puente Hisgaura, subcontratado por la empresa SACYR SUCURSAL COLOMBIA, constructor del Puente Hisgaura. La información en detalle se puede consultar ante la entidad contratante Fondo Adaptación en el documento SISLA 20181114: ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MONITOREO DEL PUENTE HISGAURA SAN ANDRÉS (COLOMBIA).

#### 3.2.3.1 Dispositivos del Sistema Automatizado de Instrumentación.

El proceso constructivo del puente, recomendó una etapa inicial de instalación de dispositivos de medición de temperatura embebidos en pilas y tablero, celdas de carga en la medida del avance de la

construcción del tablero en voladizos y la instalación de tirantes, e inclinómetros uniaxiales en pilas; que junto con el control topográfico permanente coadyuvaron en el control de ejecución del proyecto.

Inicialmente la información en esta etapa fue tomada mediante la unidad de adquisición de datos CRD-400 de Sisgeo para leer los instrumentos instalados de sensores de mV/V, de cuerda vibrante de 4 a 20 mA. Esta unidad CRD, no tiene memoria de almacenamiento de datos. Terminada la construcción, para la segunda etapa de automatización del monitoreo, se instalan los inclinómetros en pilonos.

El cableado de los dispositivos instalados en cada sitio de acuerdo a lo condensado en las tablas 1, 2, y 3 con su codificación correspondiente con el plano de instalación de la instrumentación, se realiza a través de cables multipolares, a los cuales se empalman los cables instrumentales, conectando cada instrumento con su datalogger o unidad de adquisición de datos. La conexión de todos los instrumentos se realiza al interior de los armarios o cabinas metálicos de protección, dentro del cual se resguardan los equipos de lectura y alimentación. Estas cabinas Omnicab de Sisgeo están localizadas en Pilas 3 y 4 y constituyen las unidades de adquisición de datos y que están conformadas con los siguientes equipos:

### 3.2.3.1.1 Cabina Omnicab.

- **Armario de protección.** Cabina metálica con protección IP65.
- **Datalogger.** Módulo de control y medida Omnialog de Sigeo.
- **Multiplexores.** Son tarjetas de expansión de canales que comunican el datalogger con cada uno de los dispositivos o instrumentos instalados, para su lectura. La cantidad de multiplexores es variable en función del número de dispositivos que lleguen a los dataloggers, incorporadas con “borneras”, a las cuales se conectarán los cables de los dispositivos y las protecciones por las sobretensiones de energía.
- **Batería Recargable.** Fuente de alimentación de energía de cada uno de los equipos que formen parte del sistema.
- **Cargador de Batería.** Es el cargador de la batería que estará conectada a la red de energía eléctrica con protección de sobretensiones,
- **Otros elementos.** Cada cabina está equipada con un sistema de puesta a tierra, iluminación LED alimentados a 12 V por la batería que además suministra energía al datalogger y demás elementos del tablero.

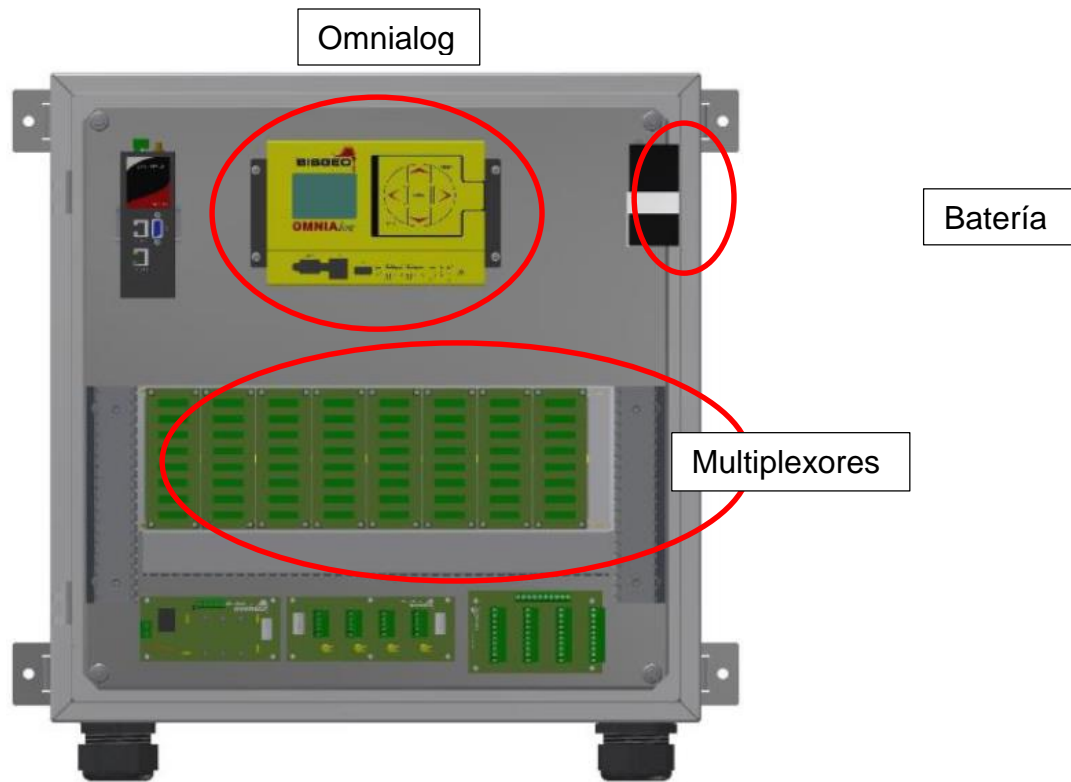


Figura 12. Armario de Adquisición de Datos de Instrumentos de Puente Atirantado Hisgaura  
*Fuente: Documento SISLA 20181114, Sacyr-Sisgeo.*

Las lecturas tomadas por estos equipos, se almacena y analizan mediante el Servicio de Gestión de Datos WMS-Web Monitoring System, de Sisgeo Latinoamérica, subcontratada por Sacyr en su etapa de obra; para el procesamiento de datos del sistema de monitoreo del puente, compuesto por la siguiente infraestructura:

- **Servidor.** Equipo para recolección y almacenamiento de las lecturas realizadas de los distintos dispositivos instalados, con características específicas para el funcionamiento con el software de Gestión y Visualización de Datos WMS.

- **Software de programación Dataloggers.** Realiza la programación de los equipos y transferencia de datos al servidor.
- **Software de gestión WMS. Programa requerido para el procesamiento de datos.**

**3.2.3.1.2 Estructura de Funcionamiento del Sistema Automatizado de Monitoreo.** El cableado de cada uno de los dispositivos o instrumentos instalados se conecta a su correspondiente multiplexor dentro de la cabina omniacab. Esta unidad es comunicada con la red de energía, mediante un cargador de batería que suministra energía a una batería recargable situada en el interior del armario.

La batería alimenta el datalogger y este, desde las salidas auxiliares de alimentación suministra la energía necesaria a los multiplexores. El datalogger indica que dispositivo se debe leer en cada momento y que alimentación debe suministrarle, recopilando y almacenando las lecturas realizadas.

El datalogger se programa mediante un PC y por medio de su propio software de configuración. Igualmente este software permite realizar la configuración de todos los dispositivos y multiplexores que forman parte de cada uno de los tableros de adquisición de datos y definir las frecuencias de lecturas. La Comunicación de los dataloggers con el servidor, se realiza mediante una conexión internet con la utilización del software de gestión de datos WMS (Web Monitoring System) y los dispositivos instalados pueden visualizarse desde cualquier terminal con acceso a la red y permiso de acceso al software.

Durante la ejecución de la obra se utilizó este software mediante una conexión internet para la transferencia de datos, generando Sisgeo Latinoamérica los usuarios necesarios para la conexión WMS del personal involucrado en el proyecto y posteriormente en la operación del puente, siendo esta, una decisión de la entidad contratante continuar o no con este operador del sistema.

### 3.2.3.1.3 Dispositivos instalados

Tabla 2

#### *Dispositivos de Celdas de Carga en Cables*

La localización, descripción y código de celdas de carga de la presente tabla, son correspondientes con los reportes típicos codificados de las tablas 5 a 16 y el plano de instrumentación.

Puente Atirantado Hisgaura				
Dispositivos Celdas de Carga instalados en el Sistema Automatizado de Monitoreo Puente Hisgaura				
No.	Dispositivo	Código	Localización dovela	Descripción
1	Celda de Carga	CLS02-P3-IZQ	Ret. P 2, vano 3	En cable 2 izq, retenida de Pila 2, vano 3 CL de Pila 3
2	Celda de Carga	CLS04-P3-DER	Ret. P 2, vano 3	En cable 4 der, retenida de Pila 2, vano 3 CL de Pila 3
3	Celda de Carga	CLS06-P3-IZQ	Dov 20 CL, vano 3, P3	En cable 6 izq, dovela 20 vano 3 CL de Pila 3
4	Celda de Carga	CLS08-P3-DER	Dov 16 CL, vano 3, P3	En cable 8 der, dovela 16 vano 3 CL de Pila 3
5	Celda de Carga	CLS10-P3-IZQ	Dov 12 CL, vano 3, P3	En cable 10 izq, dovela 12 vano 3 CL de Pila 3
6	Celda de Carga	CLS12-P3-DER	Dov 8 CL, vano 3, P3	En cable 12 der, dovela 8 vano 3 CL de Pila 3
7	Celda de Carga	CLS14-P3-IZQ	Dov 4 CL, vano 3, P3	En cable 14 izq, dovela 4 vano 3 CL de Pila 3
8	Celda de Carga	CLS16-P3-DER	Dov 0 CL, vano 3, P3	En cable 16 der, dovela 0 vano 3 CL de Pila 3
9	Celda de Carga	CCS15-P3-IZQ	Dov 2 CC, vano 4, P3	En cable 15 izq, dovela 2 vano 4 CC de Pila 3
10	Celda de Carga	CCS13-P3-DER	Dov 6 CC, vano 4, P3	En cable 13 der, dovela 6 vano 4 CC de Pila 3
11	Celda de Carga	CCS11-P3-IZQ	Dov 10 CC, vano 4, P3	En cable 11 izq, dovela 10 vano 4 CC de Pila 3
12	Celda de Carga	CCS09-P3-DER	Dov 14 CC, vano 4, P3	En cable 9 der, dovela 14 vano 4 CC de Pila 3
13	Celda de Carga	CCS07-P3-IZQ	Dov 18 CC, vano 4, P3	En cable 7 izq, dovela 18 vano 4 CC de Pila 3
14	Celda de Carga	CCS05-P3-DER	Dov 22 CC, vano 4, P3	En cable 5 der, dovela 22 vano 4 CC de Pila 3
15	Celda de Carga	CCS03-P3-IZQ	Dov 26 CC, vano 4, P3	En cable 3 izq, dovela 26 vano 4 CC de Pila 3
16	Celda de Carga	CCS01-P3-DER	Dov 30 CC, vano 4, P3	En cable 1 der, dovela 30 vano 4 CC de Pila 3
17	Celda de Carga	CCS02-P4-IZQ	Dov 28 CC, vano 4, P4	En cable 2 izq, dovela 28 vano 4 CC de Pila 4
18	Celda de Carga	CCS04-P4-DER	Dov 24 CC, vano 4, P4	En cable 4 der, dovela 24 vano 4 CC de Pila4
19	Celda de Carga	CCS06-P4-IZQ	Dov 20 CC, vano 4, P4	En cable 6 izq, dovela 20 vano 4 CC de Pila 4
20	Celda de Carga	CCS08-P4-DER	Dov 16 CC, vano 4, P4	En cable 8 der, dovela 16 vano 4 CC de Pila4
21	Celda de Carga	CCS10-P4-IZQ	Dov 12 CC, vano 4, P4	En cable 10 izq, dovela 12 vano 4 CC de Pila 4
22	Celda de Carga	CCS12-P4-DER	Dov 8 CC, vano 4, P4	En cable 12 der, dovela 8 vano 4 CC de Pila4
23	Celda de Carga	CCS14-P4-IZQ	Dov 4 CC, vano 4, P4	En cable 14 izq, dovela 4 vano 4 CC de Pila 4
24	Celda de Carga	CCS16-P4-DER	Dov 0 CC, vano 4, P4	En cable 16 der, dovela 0 vano 4 CC de Pila4
25	Celda de Carga	CLS15-P4-IZQ	Dov 2 CL, vano 5, P4	En cable 15 izq, dovela 2 vano 5 CL de Pila 4
26	Celda de Carga	CLS13-P4-DER	Dov 6 CL, vano 5, P4	En cable 13 der, dovela 6 vano 5 CL de Pila 4
27	Celda de Carga	CLS11-P4-IZQ	Dov 10 CL, vano 5, P4	En cable 11 izq, dovela 10 vano 5 CL de Pila 4
28	Celda de Carga	CLS09-P4-DER	Dov 14 CL, vano 5, P4	En cable 9 der, dovela 14 vano 5 CL de Pila 4
29	Celda de Carga	CLS07-P4-IZQ	Dov 18 CL, vano 5, P4	En cable 7 izq, dovela 18 vano 5 CL de Pila 4
30	Celda de Carga	CLS05-P4-DER	Ret. E 2, vano 5	En cable 5 der, retenida de Estribo 2, vano 5 CL de Pila 4
31	Celda de Carga	CLS03-P4-IZQ	Ret. E 2, vano 5	En cable 3 izq, retenida de Estribo 2, vano 5 CL de Pila 4
32	Celda de Carga	CLS01-P4-DER	Ret. E 2, vano 5	En cable 1 der, retenida de Estribo 2, vano 5 CL de Pila 4

Tabla 3

*Dispositivos de Inclínómetros en Pilas*

La localización, descripción y código de inclinómetros de la presente tabla, son correspondientes con los reportes típicos codificados de las tablas 17 y 18, y el plano de instrumentación.

<b>Puente Atirantado Hisgaura</b>				
<b>Dispositivos Inclínómetros instalados en el Sistema Automatizado de Monitoreo Puente Hisgaura</b>				
<b>No.</b>	<b>Dispositivo</b>	<b>Código</b>	<b>Localización dovela</b>	<b>Descripción</b>
1	Uniaxial	CL-P3-N	PILA 3	Nudo de Pilono 3
2	Biaxial	CL-P3-F-A	PILA 3	Extremo de Pilono 3
		CL-P3-F-B	PILA 3	Extremo de Pilono 3
3	Uniaxial	CL-P4-N	PILA 4	Nudo de pilono 4
4	Biaxial	CL-P4-F-A	PILA 4	Extremo de Pilono 4
		CL-P4-F-B	PILA 4	Extremo de Pilono 4

Tabla 4

*Dispositivos de termómetros instalados en dovelas, cables y pilas.*

La localización, descripción y código de termómetros instalados en dovelas, cables y pilas de la presente tabla, son correspondientes con los reportes típicos codificados de las tablas 10, 11, 12 y el plano de instrumentación.

Puente Atirantado Hisgaura				
Dispositivos Termómetros instalados en el Sistema Automatizado de Monitoreo Puente Hisgaura				
No.	Dispositivo	Código	Localización dovela	Descripción
1	Termómetro	T-P3-D-CL15	Dov 15 CL, vano 3, P3	En centro de dovela 15, vano 3 CL de Pila 3
2	Termómetro	T-P3-T-CL09-I	Dov 14 CL, vano 3, P3	En cable 9 izq, dovela 14, vano 3 CL de Pila 3
3	Termómetro	T-P3-D-CL03	Dov 3 CL, vano 3, P3	En centro de dovela 3, vano 3 CL de Pila 3
4	Termómetro	T-P3-T-CL16-D	Dov 0 CL, vano 3, P3	En cable 16 der, dovela 0, vano 3 CL de Pila 3
5	Termómetro	T-P3-T-CC16-I	Dov 0 CC, vano 4, P3	En cable 16 izq, dovela 0, vano 4 CC de Pila 3
6	Termómetro	T-P3-D-CC03	Dov 3 CC, vano 4, P3	En centro de dovela 3 vano 4 CC de Pila 3
7	Termómetro	T-P3-D-CC15	Dov 15 CC, vano 4, P3	En centro de dovela 15 vano 4 CC de Pila 3
8	Termómetro	T-P3-T-CC8-D	Do 16 CC, vano 4, P3	En cable 8 der, dovela 16, vano 4 CL de Pila 3
9	Termómetro	T-P3-T-CC7-I	Do 18 CC, vano 4, P3	En cable 7 izq, dovela 18, vano 4 CL de Pila 3
10	Termómetro	T-P4-D-CC15	Dov 15 CC, vano 4, P4	En centro de dovela 15 vano 4 CC de Pila 4
11	Termómetro	T-P4-T-CC09-I	Dov 14 CC, vano 4, P4	En cable 9 izq, dovela 14, vano 4 CC de Pila 4
12	Termómetro	T-P4-D-CC03	Dov 3 CC, vano 4, P4	En centro de dovela 3 vano 4 CC de Pila 4
13	Termómetro	T-P4-T-CC16-D	Dov 0 CC, vano 4, P4	En cable 16 der, dovela 0, vano 4 CC de Pila 4
14	Termómetro	T-P4-T-CC16-I	Dov 0 CL, vano 5, P4	En cable 16 izq, dovela 0, vano 5 CL de Pila 4
15	Termómetro	T-P4-T-CL15-D	Dov 2 CL, vano 5, P4	En cable 15 der, dovela 2, vano 5 CL de Pila 4
16	Termómetro	T-P4-D-CL03	Dov 3 CL, vano 5, P4	En centro de dovela 3, vano 5 CL de Pila 4
17	Termómetro	T-P4-D-CL15	Dov 15 CL, vano 5, P4	En centro de dovela 15, vano 5 CL de Pila 4
18	Termómetro	T-P4-T-CL08-D	Dov 16 CL, vano 5, P4	En cable 18 der, dovela 16, vano 5 CL de Pila 4
19	Termómetro	T-P2-R-I	PILA 2	Izq. De riostra inferior de Pila 2
20	Termómetro	T-P2-R-D	PILA 2	der. De riostra inferior de Pila 2
21	Termómetro	T-P3-R-I	PILA 3	Izq. De riostra inferior de Pila 3
22	Termómetro	T-P3-R-D	PILA 3	der. De riostra inferior de Pila 3
23	Termómetro	T-P3-N-INT	PILA 3	Nudo , inicio de Pilon 3
24	Celda de Carga	T-P4-R-I	PILA 4	Izq. De riostra inferior de Pila 3
25	Celda de Carga	T-P4-R-D	PILA 4	der. De riostra inferior de Pila 3
26	Celda de Carga	T-P4-N-INT	PILA 4	Nudo , inicio de Pilon 3

### **3.2.4 Operación del sistema de Automatización de la Instrumentación Puente Hisgaura**

El sistema automatizado de monitoreo, entrega información en términos de unidades internacionales de cada uno de los dispositivos instalados, de tal manera que los inclinómetros entregan lectura en términos de grados sexagesimales, los termómetros entregan lecturas en grados Celsius y las Celdas de Carga entregan lectura de tensión en Kilo Newton KN.

La información recibida mediante el software WMS, a través del servidor, está referenciada entre cada dispositivo instalado y el plano de localización de cada uno de ellos, para la observación en tiempo real y con la frecuencia que se requiera de lecturas de los elementos monitorizados que permitan diagnosticar el comportamiento general o específico de la estructura.

La programación y detalles del funcionamiento del sistema de monitoreo, ha de consultarse en el documento SISLA 20181217 de Sisgeo Latinoamérica, ante la entidad contratante Fondo Adaptación: MANUAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN PUENTE HISGAURA-SAN ANDRÉS (COLOMBIA).

**3.2.4.1. Reporte de Lecturas de dispositivos de monitoreo.** El sistema automatizado de monitoreo entrega información en tiempo real y con la frecuencia programada, de acuerdo a los siguientes formatos de entregables, que para efectos informativos se anexan de una determinada fecha y hora de información, recibida de Sacyr: Estos reportes en tiempo real, son los que presentan una visualización instantánea del monitoreo, del cual se desprenden alertas, reportes

especiales para evaluación de la salud estructural, y planes de actuación que defina la entidad a cargo.

Tabla 5  
Celdas de Carga Pila 3 en 10/10/2018


							MALA
Date	CC-P3-T-CL16-D	CC-P3-T-CC-15-I	CC-P3-T-CL-14-I	CC-P3-T-CC13-D	CC-P3-T-CL12-D	CC-P3-T-CC11-I	
	kN	kN	kN	kN	kN	kN	
10/10/2018 08:01	83,41	105,33	102,82	102,34	95,84	116,55	
10/10/2018 08:16	83,52	105,33	102,82	102,35	95,88	116,57	
10/10/2018 08:31	83,59	105,34	102,81	102,36	95,91	116,59	
10/10/2018 08:46	83,62	105,34	102,8	102,37	96,01	116,59	
10/10/2018 09:01	83,44	105,35	102,74	102,36	96,12	116,63	
10/10/2018 09:16	83,3	105,36	102,7	102,36	96,2	116,65	
10/10/2018 09:31	83,31	105,38	102,64	102,4	96,23	116,66	

Tabla 6  
Celdas de Carga Pila 3 en 10/10/2018

PUENTES VEHICULARES MALAGA - LOS CUROS. REGISTRO CELDAS DE CARGA P3.						
CC-P3-T-CL10-I	CC-P3-T-CC09-D	CC-P3-T-CL08-D	CC-P3-T-CC07-I	CC-P3-T-CL06-I	CC-P3-T-CC05-D	CC-P3-T-CL04-D
kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
119,36	122,14	135,66	129,23	131,19	130,15	96,28
119,29	122,13	135,7	129,25	131,03	130,11	96,15
119,21	122,19	135,76	129,27	130,98	130,12	96,04
119,04	122,1	135,75	129,26	130,89	130,19	95,88
118,8	122,06	135,8	129,25	130,79	130,25	95,78
118,91	122,04	135,84	129,25	130,72	130,26	95,72
118,94	122,1	135,86	129,26	130,68	130,25	95,73

Tabla 7  
Celdas de Carga Pila 3 en 10/10/2018

CC-P3-T-CC05-D	CC-P3-T-CL04-D	CC-P3-T-CC03-I	CC-P3-T-CL02-I	CC-P3-T-CC01-D
kN	kN	kN	kN	kN
130,15	96,28	130,35	134,93	126,58
130,11	96,15	130,37	134,83	126,57
130,12	96,04	130,37	134,75	126,59
130,19	95,88	130,36	134,6	126,59
130,25	95,78	130,36	134,45	126,59
130,26	95,72	130,36	134,32	126,62
130,25	95,73	130,38	134,26	126,64

Tabla 8  
Celdas de Carga Pila 3 en 10/11/2018


 <span style="float: right;">MALA</span>						
Date	CC-P3-T-CL16-D	CC-P3-T-CC-15-I	CC-P3-T-CL-14-I	CC-P3-T-CC13-D	CC-P3-T-CL12-D	CC-P3-T-CC11-I
	kN	kN	kN	kN	kN	kN
10/11/2018 03:56	83,32	105,23	104,71	104,1	106,78	115,68
10/11/2018 04:11	83,33	105,22	104,71	103,81	106,77	115,68
10/11/2018 04:26	83,36	105,2	104,72	104,11	106,77	115,67
10/11/2018 04:41	83,36	105,19	104,72	103,84	106,76	115,65
10/11/2018 04:56	83,37	105,19	104,74	103,87	106,77	115,65
10/11/2018 05:11	83,38	105,18	104,73	103,73	106,76	115,64
10/11/2018 05:26	83,4	105,18	104,75	104,15	106,72	115,64

Tabla 9  
Celdas de Carga Pila 3 en 10/11/2018

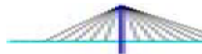
Puentes Vehiculares GA - LOS CUROS. REGISTRO CELDAS DE CARGA P3. 						
CC-P3-T-CL10-I	CC-P3-T-CC09-D	CC-P3-T-CL08-D	CC-P3-T-CC07-I	CC-P3-T-CL06-I	CC-P3-T-CC05-D	CC-P3-T-CL04-D
kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
120,07	122,45	135,29	129,35	132,1	130,52	97,71
120,05	122,46	135,29	129,37	132,12	130,52	97,72
120,04	122,45	135,26	129,35	132,11	130,51	97,71
120,02	122,43	135,25	129,34	132,12	130,49	97,7
119,99	122,42	135,24	129,35	132,14	130,49	97,7
119,99	122,39	135,23	129,34	132,16	130,48	97,71
119,98	122,43	135,23	129,35	132,14	130,48	97,69

Tabla 10  
Celdas de Carga Pila 3 en 10/11/2018


				
CC-P3-T-CC05-D	CC-P3-T-CL04-D	CC-P3-T-CC03-I	CC-P3-T-CL02-I	CC-P3-T-CC01-D
kN	kN	kN	kN	kN
130,52	97,71	130,13	135,47	126,74
130,52	97,72	130,13	135,48	126,73
130,51	97,71	130,14	135,47	126,74
130,49	97,7	130,12	135,45	126,73
130,49	97,7	130,13	135,44	126,72
130,48	97,71	130,13	135,45	126,72
130,48	97,69	130,13	135,45	126,73

Tabla 11  
Celdas de Carga Pila 4 en 12/10/2018


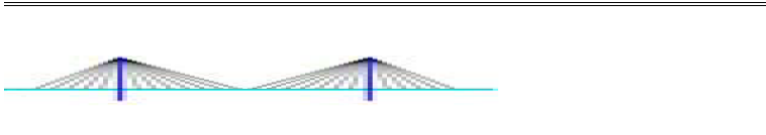
						
Date	CC-P4-T-CC16-D	CC-P4-T-CL15-I	CC-P4-T-CC14-I	CC-P4-T-CL13-D	CC-P4-T-CC12-D	CC-P4-T-CL11-I
	kN	kN	kN	kN	kN	kN
12/10/2018 00:00	78,91	121,38	128,01	148,76	120,19	121,77
12/10/2018 00:15	78,91	121,41	128,07	148,78	120,16	121,76
12/10/2018 00:30	78,91	121,45	128,09	148,8	120,17	121,76
12/10/2018 00:45	78,92	121,42	128,11	148,81	120,17	121,75
12/10/2018 01:00	78,92	121,38	128,27	148,82	120,16	121,76
12/10/2018 01:15	78,92	121,4	128,34	148,83	120,14	121,75
12/10/2018 01:30	78,93	121,32	128,36	148,83	120,11	121,75

Tabla 12  
Celdas de Carga Pila 4 en 12/10/2018

**PUENTES VEHICULARES  
MALAGA - LOS CUROS.REGISTRO CELDAS DE CARGA P4.**

CC-P4-T-CC10-I	CC-P4-T-CL09-D	CC-P4-T-CC08-D	CC-P4-T-CL07-I	CC-P4-T-CC06-I	CC-P4-T-CL05-D
kN	kN	kN	kN	kN	kN
127,74	130,16	145,17	130,85	136,71	137,13
127,75	130,16	145,16	130,85	136,74	137,13
127,74	130,18	145,16	130,85	136,74	137,13
127,75	130,19	145,16	130,86	136,75	137,12
127,73	130,18	145,17	130,86	136,75	137,14
127,74	130,19	145,18	130,87	136,74	137,12
127,74	130,21	145,18	130,88	136,74	137,14

Tabla 13  
Celdas de Carga Pila 4 en 12/10/2018



CC-P4-T-CC04-D	CC-P4-T-CL03-I	CC-P4-T-CC02-I	CC-P4-T-CL01-D
kN	kN	kN	kN
132,8	124,08	128,72	122,35
132,81	124,08	128,71	122,34
132,82	124,07	128,71	122,34
132,81	124,08	128,71	122,34
132,8	124,07	128,72	122,33
132,8	124,05	128,72	122,32
132,78	124,05	128,73	122,31

Tabla 14  
Celdas de Carga Pila 4 en 24/10/2018


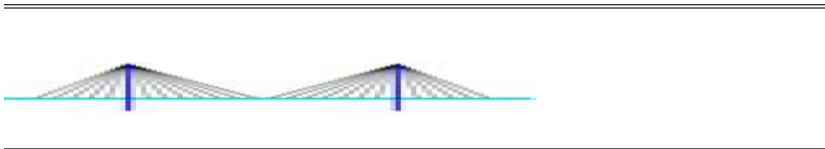
						
Date	CC-P4-T-CC16-D	CC-P4-T-CL15-I	CC-P4-T-CC14-I	CC-P4-T-CL13-D	CC-P4-T-CC12-D	CC-P4-T-CL11-I
	kN	kN	kN	kN	kN	kN
24/10/2018 03:45	79,17	119,81	134,16	148,81	119,64	121,59
24/10/2018 04:00	79,16	119,82	134,18	148,81	119,65	121,58
24/10/2018 04:15	79,16	119,82	134,2	148,81	119,64	121,59
24/10/2018 04:30	79,16	119,81	134,22	148,81	119,61	121,58
24/10/2018 04:45	79,16	119,84	134,24	148,81	119,56	121,58
24/10/2018 05:00	79,17	119,83	134,25	148,81	119,61	121,59
24/10/2018 05:15	79,18	119,83	134,3	148,81	119,62	121,59

Tabla 15  
Celdas de Carga Pila 4 en 24/10/2018

**PUENTES VEHICULARES**  
**MALAGA - LOS CUROS.REGISTRO CELDAS DE CARGA P4.**

CC-P4-T-CC10-I	CC-P4-T-CL09-D	CC-P4-T-CC08-D	CC-P4-T-CL07-I	CC-P4-T-CC06-I	CC-P4-T-CL05-D
kN	kN	kN	kN	kN	kN
127,43	130,37	145,1	131,09	136,66	137,08
127,44	130,38	145,11	131,1	136,67	137,07
127,43	130,38	145,1	131,1	136,67	137,08
127,43	130,38	145,1	131,1	136,67	137,07
127,43	130,4	145,09	131,11	136,67	137,06
127,42	130,39	145,1	131,1	136,67	137,07
127,4	130,4	145,09	131,11	136,67	137,07

Tabla 16  
Celdas de Carga Pila 4 en 24/10/2018



CC-P4-T-CC04-D	CC-P4-T-CL03-I	CC-P4-T-CC02-I	CC-P4-T-CL01-D
kN	kN	kN	kN
132,65	124,08	128,77	121,99
132,64	124,07	128,77	121,99
132,64	124,06	128,78	121,98
132,63	124,07	128,78	121,97
132,62	124,07	128,78	121,96
132,62	124,07	128,78	121,96
132,62	124,07	128,77	121,96

Tabla 17  
Inclinómetros de Pila 3 en 10/10/2018 y 10/11/2018



 MALA				 MALA			
DATE	CL-P3-N	CL-P3-F-A	CL-P3-F-B	DATE	CL-P3-N	CL-P3-F-A	CL-P3-F-B
	°	°	°		°	°	°
10/10/2018 08:01	0,0161	-0,0056	-0,1241	10/11/2018 01:26	0,0753	0	-0,1247
10/10/2018 08:16	0,0149	-0,0062	-0,1148	10/11/2018 01:41	0,076	-0,0013	-0,1247
10/10/2018 08:31	0,0149	-0,0056	-0,1098	10/11/2018 01:56	0,0747	-0,0013	-0,1223
10/10/2018 08:46	0,0155	-0,005	-0,0986	10/11/2018 02:11	0,0735	0	-0,1273
10/10/2018 09:01	0,0161	-0,005	-0,0973	10/11/2018 02:26	0,0747	-0,0013	-0,1228
10/10/2018 09:16	0,0155	-0,0037	-0,0998	10/11/2018 02:41	0,0753	-0,0018	-0,1247
10/10/2018 09:31	0,0167	-0,0031	-0,0917	10/11/2018 02:56	0,0747	-0,0018	-0,126

Tabla 18  
Inclinómetros de Pila 4 en 12/10/2018 y 12/11/2018



 MALA				 MALA			
DATE	CL-P4-N	CL-P4-F-A	CL-P4-F-B	DATE	CL-P4-N	CL-P4-F-A	CL-P4-F-B
	°	°	°		°	°	°
12/10/2018 00:00	0,0947	-0,206	0,1029	12/11/2018 11:30	0,0317	-0,206	0,0867
12/10/2018 00:15	0,0934	-0,2054	0,1016	12/11/2018 11:45	0,0311	-0,206	0,0861
12/10/2018 00:30	0,0947	-0,2042	0,1016	12/11/2018 12:00	0,0324	-0,2036	0,0898
12/10/2018 00:45	0,0941	-0,206	0,1029	12/11/2018 12:15	0,033	-0,2079	0,0898
12/10/2018 01:00	0,0953	-0,2048	0,0992	12/11/2018 12:30	0,0305	-0,2079	0,0917
12/10/2018 01:15	0,0947	-0,2054	0,0998	12/11/2018 12:45	0,0299	-0,2072	0,0892
12/10/2018 01:30	0,0947	-0,2085	0,101	12/11/2018 13:00	0,0286	-0,2085	0,0936

Tabla 19  
Termómetros en Pila 2 en 29/09/2018


 MALA		
Date	T-P2-R-D	T-P2-R-I
	°C	°C
29/09/2018 00:01	22,7	22,7
29/09/2018 00:16	22,7	22,7
29/09/2018 00:31	22,7	22,7
29/09/2018 00:46	22,7	22,7
29/09/2018 01:01	22,7	22,7
29/09/2018 01:16	22,7	22,7
29/09/2018 01:31	22,7	22,7

Tabla 20  
Termómetros en Pila 3, tablero y cables en 10/10/2018



 <b>PUENTES VEHICULARES</b> <b>MALAGA - LOS CUROS. REGISTRO TERMOMETROS P3.</b> 												
Date	T-P3-R-D	T-P3-R-I	T-P3-N-INT	T-P3-T-CC16-I	T-P3-T-CL16-D	T-P3-D-CC03	T-P3-D-CL03	T-P3-T-CL09-I	T-P3-D-CC15	T-P3-D-CL15	T-P3-T-CC08-D	CC-P3-T-CC07-I
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
10/10/2018 08:01	21,2	20	21,8	17,7	18,4	21,8	20,7	18,9	19,9	22	18,3	16,9
10/10/2018 08:16	21,2	20	21,8	18,1	19,1	21,8	20,7	19,7	19,9	22	19	16,9
10/10/2018 08:31	21,3	20	21,8	18,4	19,7	21,8	20,8	20,4	20	22	19,6	16,9
10/10/2018 08:46	21,2	20	21,8	18,7	20,2	21,8	20,7	21,4	19,9	22	20,1	16,9
10/10/2018 09:01	21,2	20	21,8	19,1	20,7	21,7	20,7	22,2	20	22	20,7	16,9
10/10/2018 09:16	21,2	20	21,8	19,4	21,1	21,8	20,7	22,8	20	22	21,2	16,9
10/10/2018 09:31	21,3	20	21,8	19,8	21,6	21,8	20,8	23,4	20,1	22	22	16,9
10/10/2018 09:46	21,2	20	21,8	20	21,9	21,8	20,9	23,5	20,2	22,1	22,4	16,9
10/10/2018 10:01	21,2	20	21,8	20,2	22,2	21,9	20,9	23,4	20,3	22,1	22,7	16,9
10/10/2018 10:16	21,2	20	21,8	20,4	22,6	21,9	21	23,8	20,3	22,2	23,2	16,9
22/10/2018 11:26	21,6	20,4	22,2	19,8	20,8	21,4	20,3	21,2	19,9	21,3	21,5	16,9
22/10/2018 11:41	21,6	20,4	22,2	19,8	20,3	21,4	20,3	20,6	20	21,3	21,3	16,9
22/10/2018 11:56	21,6	20,4	22,2	19,9	20,4	21,4	20,4	20,8	20	21,4	21,4	16,9
22/10/2018 12:11	21,6	20,3	22,1	20,2	20,8	21,4	20,3	21,2	20,1	21,4	21,7	16,9
22/10/2018 12:26	21,6	20,4	22,2	20,5	21,3	21,4	20,4	21,7	20,1	21,4	22,2	16,9

Tabla 21  
Termómetros en Pila 4, tablero y cables en 10/10/2018



 <b>PUENTES VEHICULARES</b> <b>MALAGA - LOS CUROS. REGISTRO TERMOMETROS P4.</b> 												
Date	T-P4-N-INT	T-P4-R-I	T-P4-R-D	T-P4-T-CC16-D	T-P4-T-CL16-I	T-P4-T-CL08-D	T-P4-D-CC03	T-P4-D-CL03	T-P4-T-CC09-I	T-P4-D-CC15	T-P4-D-CL15	
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
12/10/2018 08:15	22,5	21	21,3	22	18,8	18,6	19,2	20,8	19,5	19,7	21,2	
12/10/2018 08:30	22,5	21	21,3	22	19	18,9	19,7	20,7	20,1	19,7	21,2	
12/10/2018 08:45	22,5	21	21,3	22	19,4	19,3	20,4	20,8	21,3	19,7	21,2	
12/10/2018 09:00	22,5	21	21,3	22	19,8	19,8	21	20,8	21,7	19,7	21,2	
12/10/2018 09:15	22,5	21	21,3	22,1	20,2	20,4	22	20,7	23	19,7	21,2	
12/10/2018 09:30	22,5	21	21,3	22,1	20,6	20,6	22,3	20,7	23,5	19,7	21,2	
12/10/2018 09:45	22,5	21	21,3	22,2	20,8	20,7	22	20,8	22,2	19,8	21,3	
12/10/2018 10:00	22,5	21	21,3	22,2	20,9	20,9	21,9	20,8	22,1	19,8	21,2	
12/10/2018 10:15	22,5	21	21,3	22,2	21,1	21,2	22,2	20,9	22,3	19,8	21,3	
12/10/2018 10:30	22,5	21	21,3	22,2	21,3	21,5	22,8	20,9	23,2	19,9	21,3	
12/10/2018 10:45	22,5	21	21,3	22,3	21,6	21,8	22,9	20,9	23,2	20	21,3	
12/10/2018 11:00	22,5	21	21,3	22,3	21,8	22	23	21	23,3	20	21,3	
12/10/2018 11:15	22,5	21	21,3	22,3	21,9	22,2	22,8	21	22,8	20	21,3	
12/10/2018 11:30	22,5	21	21,3	22,4	22,3	22,8	24,1	21,1	25	20,1	21,3	
12/10/2018 11:45	22,5	21	21,3	22,5	22,7	23,3	25	21,1	26,4	20,2	21,4	
12/10/2018 12:00	22,5	21	21,3	22,6	22,9	23,4	24,6	21,2	25,2	20,3	21,4	
12/10/2018 12:15	22,5	21	21,3	22,6	23	23,4	24,2	21,3	24,6	20,4	21,5	
12/10/2018 12:30	22,4	21	21,3	22,7	23,1	23,6	24,2	21,4	24,5	20,5	21,5	
12/10/2018 12:45	22,5	21	21,3	22,7	23,4	24,2	24,9	21,5	25,8	20,6	21,6	
12/10/2018 13:00	22,5	21	21,3	22,8	23,6	24,2	24,5	21,5	26,4	20,7	21,6	



Tabla 23

Reportes de Celdas de Carga en Cables, Termómetros en Cables y Tablero Vanos 3 y 4 de Pila 3.

Puente Atirantado Hsgaura														
Distribución de Dovelas, Cables, Celdas de Carga, Tensión en Celdas y en cables; termómetros y temperatura														
	Dovela	Cable No.	C.Toro nes	Celda KN	Cable KN	Term No.	Term ° C	Dovela	Cable No.	C.Toro nes	Celda KN	Cable KN	Term No.	Term ° C
Registros del día 10-10-2018 a las 08:01						Sentido de registro: P2 a E2, izq tablero (occidente), der tablero (oriente)								
VANO 3 - PILONO 3	Ret. P 2	CLS01-P3-IZQ	29					Ret. P 2	CLS01-P3-DER	29				
	Ret. P 2	CLS02-P3-IZQ	29	134,9	3.912,97			Ret. P 2	CLS02-P3-DER	29				
	Ret. P 2	CLS03-P3-IZQ	29					Ret. P 2	CLS03-P3-DER	29				
	Ret. P 2	CLS04-P3-IZQ	29					Ret. P 2	CLS04-P3-DER	29	96,28	2.792,12		
	Ret. P 2	CLS05-P3-IZQ	16					Ret. P 2	CLS05-P3-DER	16				
	21							21						
	20	CLS06-P3-IZQ	24	131,2	3.148,56			20	CLS06-P3-DER	24				
	19							19						
	18	CLS07-P3-IZQ	19					18	CLS07-P3-DER	19				
	17							17						
	16	CLS08-P3-IZQ	22					16	CLS08-P3-DER	22	135,7	2.984,52		
	15						Centro		15				T-P3-D-CL15	22
	14	CLS09-P3-IZQ	22				T-P3-T-CL09-I	18,9	14	CLS09-P3-DER	22			
	13								13					
	12	CLS10-P3-IZQ	22	119,4	2.625,92				12	CLS10-P3-DER	22			
	11								11					
	10	CLS11-P3-IZQ	16						10	CLS11-P3-DER	16			
9								9						
8	CLS12-P3-IZQ	16						8	CLS12-P3-DER	16	95,84	1.533,44		
7								7						
6	CLS13-P3-IZQ	14						6	CLS13-P3-DER	14				
5								5						
4	CLS14-P3-IZQ	13	102,8	1336,66				4	CLS14-P3-DER	13				
3						Centro		3					T-P3-D-CL03	20,7
2	CLS15-P3-IZQ	14						2	CLS15-P3-DER	14				
1								1						
0	CLS16-P3-IZQ	20						0	CLS16-P3-DER	20	83,41	1.668,20	T-P3-T-CL16-D	18,4
PILONO 3														
VANO 4 - PILONO 3	0	CCS16-P3-IZQ	20			T-P3-T-CC16-I	17,7	0	CCS16-P3-DER	20				
	1							1						
	2	CCS15-P3-IZQ	15	105,3	1.579,95			2	CCS15-P3-DER	15				
	3					Centro		3					T-P3-D-CC03	21,8
	4	CCS14-P3-IZQ	13					4	CCS14-P3-DER	13				
	5							5						
	6	CCS13-P3-IZQ	14					6	CCS13-P3-DER	14	102,3	1.432,76		
	7							7						
	8	CCS12-P3-IZQ	19					8	CCS12-P3-DER	19				
	9							9						
	10	CCS11-P3-IZQ	19	116,6	2.214,45			10	CCS11-P3-DER	19				
	11							11						
	12	CCS10-P3-IZQ	22					12	CCS10-P3-DER	22				
	13							13						
	14	CCS09-P3-IZQ	26					14	CCS09-P3-DER	26	122,1	3.175,64		
	15						Centro		15				T-P3-D-CC15	19,9
	16	CCS08-P3-IZQ	19						16	CCS08-P3-DER	19			T-P3-T-CC8-D
17								17						
18	CCS07-P3-IZQ	22	129,2	2.843,06		T-P3-T-CC7-I	16,9	18	CCS07-P3-DER	22				
19								19						
20	CCS06-P3-IZQ	22						20	CCS06-P3-DER	22				
21								21						
22	CCS05-P3-IZQ	22						22	CCS05-P3-DER	22	130,2	2.863,30		
23								23						
24	CCS04-P3-IZQ	26						24	CCS04-P3-DER	26				
25								25						
26	CCS03-P3-IZQ	29	130,4	3.780,15				26	CCS03-P3-DER	29				
27								27						
28	CCS02-P3-IZQ	29						28	CCS02-P3-DER	29				
29								29						
30	CCS01-P3-IZQ	29						30	CCS01-P3-DER	29	126,6	3.670,82		
DOVELA DE CIERRE														

Tabla 24  
Reportes de Celdas de Carga en Cables, Termómetros en Cables y Tablero Vanos 4 y 5 de Pila 4.

Puente Atirantado Hisgaura														
Distribución de Dovelas, Cables, Celdas de Carga, Tensión en Celdas y en cables; termómetros y temperatura														
Dovela	Cable No.	C.Toro nes	Celda KN	Cable KN	Term No.	Term ° C	Dovela	Cable No.	C.Toro nes	Celda KN	Cable KN	Term No.	Term ° C	
Registros del día 12-10-2018 a las 00:00					Sentido de registro: P2 a E2, izq tablero (occidente), der tablero (oriente)									
<b>DOVELA DE CIERRE</b>														
VANO 4 - PILONO 4	30	CCS01-P4-IZQ	21				30	CCS01-P4-DER	21					
	29						29							
	28	CCS02-P4-IZQ	29	128,7	3.732,88		28	CCS02-P4-DER	29					
	27						27							
	26	CCS03-P4-IZQ	27				26	CCS03-P4-DER	27					
	25						25							
	24	CCS04-P4-IZQ	22				24	CCS04-P4-DER	22	132,8	2.921,60			
	23						23							
	22	CCS05-P4-IZQ	23				22	CCS05-P4-DER	23					
	21						21							
	20	CCS06-P4-IZQ	22	136,7	3.007,62		20	CCS06-P4-DER	22					
	19						19							
	18	CCS07-P4-IZQ	19				18	CCS07-P4-DER	19					
	17						17							
	16	CCS08-P4-IZQ	22				16	CCS08-P4-DER	22	145,2	3.193,74			
	15					Centro	15					T-P4-D-CC15	21,3	
	14	CCS09-P4-IZQ	22			T-P4-T-CC09-I	19,4	14	CCS09-P4-DER	22				
13						13								
12	CCS10-P4-IZQ	22	127,7	2.810,28		12	CCS10-P4-DER	22						
11						11								
10	CCS11-P4-IZQ	19				10	CCS11-P4-DER	19						
9						9								
8	CCS12-P4-IZQ	16				8	CCS12-P4-DER	16	120,2	1.923,04				
7						7								
6	CCS13-P4-IZQ	14				6	CCS13-P4-DER	14						
5						5								
4	CCS14-P4-IZQ	14	128	1.792,14		4	CCS14-P4-DER	14						
3					Centro	3					T-P4-D-CC03	19,2		
2	CCS15-P4-IZQ	15				2	CCS15-P4-DER	15						
1						1								
0	CCS16-P4-IZQ	20				0	CCS16-P4-DER	20	78,91	1.578,20	T-P4-T-CC16-D	23		
<b>PILONO 4</b>														
VANO 5 - PILONO 4	0	CLS16-P4-IZQ	20			T-P4-T-CC16-I	20,4	0	CLS16-P4-DER	20				
	1							1						
	2	CLS15-P4-IZQ	16	121,4	1.942,08		2	CLS15-P4-DER	16			T-P4-T-CL15-D		
	3					Centro	3					T-P4-D-CL03	22,4	
	4	CLS14-P4-IZQ	14				4	CLS14-P4-DER	14					
	5						5							
	6	CLS13-P4-IZQ	14				6	CLS13-P4-DER	14	148,8	2.082,64			
	7						7							
	8	CLS12-P4-IZQ	16				8	CLS12-P4-DER	16					
	9						9							
	10	CLS11-P4-IZQ	19	121,8	2.313,63		10	CLS11-P4-DER	19					
	11						11							
	12	CLS10-P4-IZQ	22				12	CLS10-P4-DER	22					
	13						13							
	14	CLS09-P4-IZQ	22				14	CLS09-P4-DER	22	130,2	2.863,52			
	15					Centro	15					T-P4-D-CL15	22,1	
	16	CLS08-P4-IZQ	19				16	CLS08-P4-DER	19			T-P4-T-CL08-D	19,5	
	17						17							
	18	CLS07-P4-IZQ	16	130,9	2.093,60		18	CLS07-P4-DER	16					
	19						19							
	20	CLS06-P4-IZQ	19				20	CLS06-P4-DER	19					
21						21								
Ret. E2	CLS05-P4-IZQ	18				Ret. E2	CLS05-P4-DER	18	137,1	2.468,34				
Ret. E2	CLS04-P4-IZQ	29				Ret. E2	CLS04-P4-DER	29						
Ret. E2	CLS03-P4-IZQ	30	124,1	3.722,40		Ret. E2	CLS03-P4-DER	30						
Ret. E2	CLS02-P4-IZQ	30				Ret. E2	CLS02-P4-DER	30						
Ret. E2	CLS01-P4-IZQ	29				Ret. E2	CLS01-P4-DER	29	122,4	3.548,15				

Tabla 25

*Reportes de Termómetros en Pilas 2, 3 y 4*

Puente Atirantado Hisgaura									
Reportes de Termómetros en Pilas 2, pilonos 3 y 4									
Fecha	Hora	PILA 2		PILONO 3			PILONO 4		
		Term. No.	Term. No.	Term. No.	Term. No.	Term. No.	Term. No.	Term. No.	Term. No.
		T-P2-R-D	T-P2-R-I	T-P3-R-D	T-P3-R-I	T-P3-N-INT	T-P4-R-D	T-43-R-I	T-P4-N-INT
		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
29/09/2018	00:01	22,7	22,7						
	04:01	22,7	22,7						
	08:01	22,7	22,7						
10/10/2018	08:01			21,2	20	21,8			
	10:16			21,2	20	21,8			
12/10/2018	00:00						22,5	21	21,3
	08:00						22,5	21	21,3

En el cuadro de reportes de Celdas de Carga en Cables, ha de tenerse en cuenta la distribución en los cables definidos, que refleja la distribución física en el tablero. La lectura de cada celda de carga, debe multiplicarse por el número de torones del respectivo cable, puesto que la celda de carga está midiendo la tensión en un torón del grupo de torones del cable.

3.2.4.3 Fichas Técnicas de dispositivos instalados

**Description**

This load cell has been specifically developed to comply with the VSL SSI 2000 Stay Cable System. The aim is to monitor the status of the cable stay force by installing one sensor on a selected strand of the anchorage.

This load cell is compatible with standard Monitoring device and it can be provided with basic Reading unit, Automatic Reading Unit or specific VSL Fieldbus.

**Features**

- Height: 180 mm
- Diameter: SSI 2000 Size
- Material: SSI 2000 material
- Protection: IP 65, Grease, Wax compatible

**Load cells Types**

This load cell can be used for static load monitoring. Static load monitoring is recommended for long term monitoring of structures when low variations are expected. The Hc 160 allows direct reading by portable unit or remote reading through conditioned signal.

**Range**

The load cell is designed to achieve the highest precision in a nominal range between 40 to 160 kN.

Maximum force that can be applied on the load cell with no damage on the calibration is 300 kN.

**Precision**

The load cell is calibrated with VSL internal Quality Assurance procedure. Precision obtained with laboratory electronic equipment is better than 0.4%. Each load cell is supplied with its own VSL internal calibration sheet.

**Services**

Besides load cell installation, VSL offers global data management services. Solutions vary from a Portable Reading Unit (VSL-PRU) to a complete automatic dynamic acquisition system with internet access to the data.

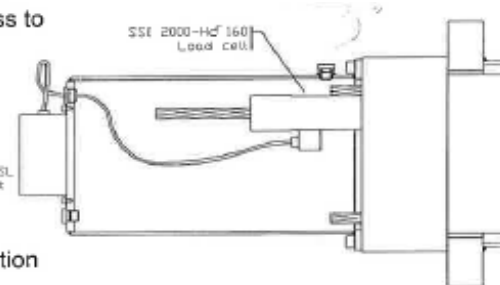
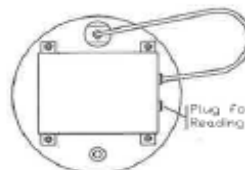


Figure1 : Sketch of Installation

Figura 13. Celda de Carga para lectura de tensión en cables.

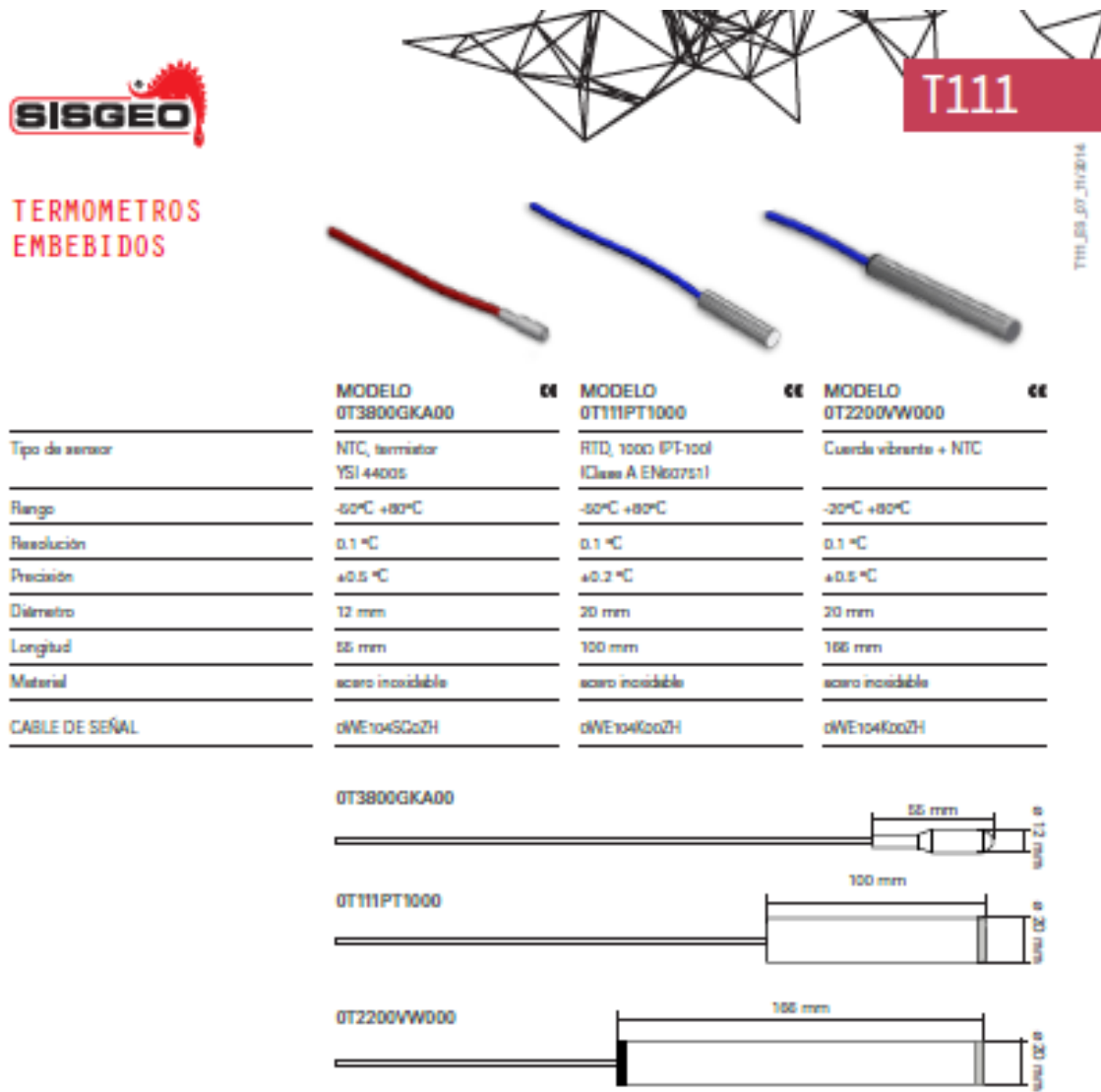


Figura 14. Termómetros modelo OT3800GKA00, instalados en Pilas, Cables y Tablero







## CLINOMETROS MEMS PARA EDIFICIOS Y ESTRUCTURAS

La medición de la inclinación es fundamental para el control y la seguridad de estructuras en elevación bien sea durante la fase de construcción que en ejercicio.

Los clinómetros MEMS permiten monitorizar las variaciones de inclinaciones bien sea sobre un único eje, bien sea sobre dos planos perpendiculares a la superficie sobre la cuál están posicionados.

Los clinómetros vienen instalados permanentemente para monitorizar a largo plazo y están proyectados para lecturas manuales o controlizados con datalogger OMNIAlog para monitoreo en remoto.

APLICACIONES	CARACTERISTICAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puentes y muelles</li> <li>• Edificios históricos</li> <li>• Pruebas en hormigón</li> <li>• Pruebas de carga estructurales</li> <li>• Monitorio de deslizamientos de tierra</li> <li>• Monitorio de estructuras adyacentes a excavaciones</li> <li>• Torres eólicas</li> <li>• Muros de contención</li> <li>• Sedimentos del terreno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalaciones verticales o horizontales</li> <li>• Monoaxiales y biaxiales</li> <li>• Simples de instalar</li> <li>• Elevadas prestaciones</li> <li>• Estabilidad a largo plazo</li> <li>• Variaciones térmicas auto-compensadas</li> <li>• Precisión y resistencia</li> <li>• Dimensiones reducidas para un menor impacto visual</li> </ul>


 Satisface los requisitos esenciales de la Directiva de Compatibilidad Electromagnética 2004/108/EC

WWW.SISGEO.IT
CLINOMETROS MEMS 2

Figura 15.Ficha técnica general de Inclinómetros instalados en Pilas 3 y 4

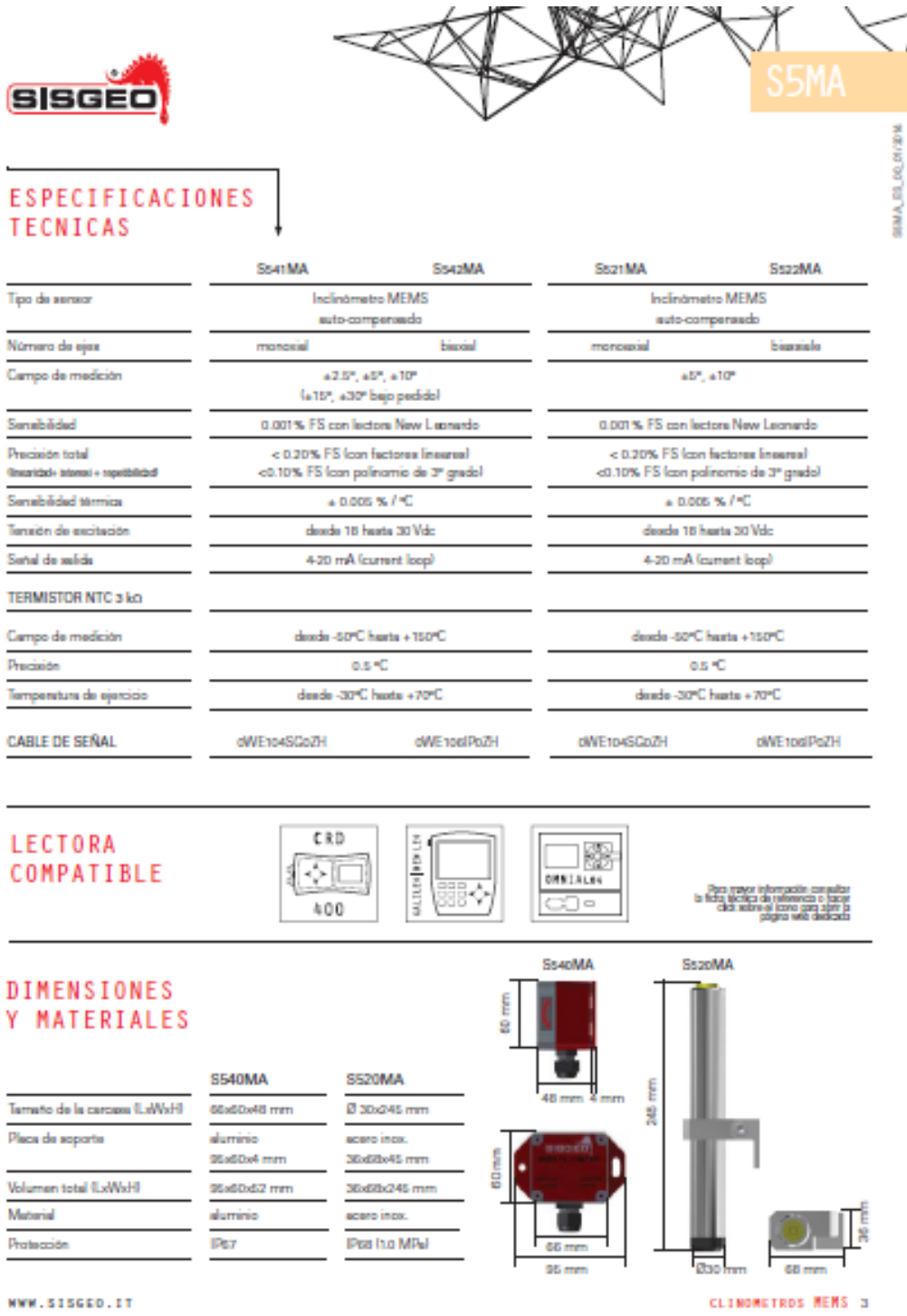


Figura 16. Ficha técnica inclinómetros  
 Inclinómetro Uniaxial, modelo 05541MA0500  
 Inclinómetro Biaxial, modelo 05542ma0500

**3.2.5. Validación Estructural.** En el proceso constructivo del Puente Hisgaura se realizaron actividades de regularización de la rasante del tablero, requiriendo la construcción de recredidos, que generan un incremento en las cargas muertas sobreimpuestas con el correspondiente incremento de las fuerzas estáticas y sísmicas. Por lo anterior se realizó una validación de diseño con una evaluación de tensiones en cables antes y después de las cargas muertas y adición de torones en algunos cables a fin de garantizar la estabilidad estructural del puente.

Las Notas Técnicas NT 114 y 116 del diseñador y constructor del puente, presentan la validación estructural que puede consultarse a través del Fondo Adaptación.

**3.2.6 Prueba de Carga Estática y Dinámica.** Con el objeto de verificar el comportamiento estático y dinámico real del puente, se realizaron las pruebas estáticas frente a cargas gravitatorias y vivas verticales y pruebas dinámicas frente a vibraciones verticales del tablero, y al modelo utilizado en el diseño.

**Prueba de Carga Estática:** en resumen la Prueba de Carga Estática se realizó una vez fueron terminadas las barreras vehiculares, peatonales y colocación del pavimento, hecho que se dio entre los días 4 a 7 de diciembre, en los cuales se realizaron doce (12) estados de carga, en consulta con el documento: PUENTE HISGAURA, PRUEBA DE CARGA, versión 11 de noviembre de 2018, el cual puede ser consultado con la entidad contratante Fondo Adaptación.

Tabla 26  
*Estados de Carga para Prueba Estática*

Estado	Posición	No. Camiones (-)	Carga Total (kN)
1	Centro Vano 4	7 camiones de 32Tn	2197
2	Vano 5	7 camiones de 28Tn	1923
3	Vano 3	7 camiones de 28Tn	1923
4	Pilono 3	7 camiones de 32Tn	2197
5	Pilono 4	7 camiones de 32Tn	2197
6	Intermedia Inicial Vano 4	7 camiones de 32Tn	2197
7	Intermedia Final Vano 4	7 camiones de 32Tn	2197
8	Vano 1	4 camiones de 32Tn	1256
9	Vano 2	4 camiones de 32Tn	1256
10	Pila 1	6 camiones de 32Tn	1884
11	Vano 4 Completo	7 camiones de 32Tn 7 camiones de 28Tn	4120
12	Vano 4 Completo Excéntrica	7 camiones de 32Tn 7 camiones de 28Tn	4120

El conjunto de operaciones para reproducir los 12 estados de carga, estuvieron encaminados a determinar que para las situaciones de carga representativas del 70% de las cargas máximas teóricas, las deformaciones medidas sobre la estructura fueran similares a las teóricas del modelo, dentro de los márgenes definidos en los documentos guía de las pruebas de carga: 18112 Prueba de Carga V11, y PHI-ES-P.01-PL01-06.V6.

#### **Resultados de la Prueba de Carga Estática:**

- Estado de Carga 1: flecha máxima en el centro de la luz, zona menos rígida del puente, fueron satisfactorias todas las comprobaciones con el 97%. De la flecha máxima prevista.
- Estado de Carga 2: análisis del comportamiento del vano 5 con comportamientos de flechas del 75% y remanencia del 2%, satisfactorios con los previstos.

- Estado de Carga 3: análisis del comportamiento del vano 3 con comportamientos de flechas del 68% y remanencia del 9,9%, satisfactorios con los previstos.
- Estado de Carga 4: se revisa el comportamiento del vano central cuando se cargan los tirantes adyacentes a Pila 3. Siendo bajas las deformaciones teóricas, se hace corrección por temperatura a cada cota tomada. La flecha supera en 5 mm la teórica, que está dentro del margen de error de los aparatos de medición.
- Estado de Carga 5: se revisa el comportamiento del vano central cuando se cargan los tirantes adyacentes a Pila 4. Comprobaciones de 100,6% de flecha y remanencia de 7,4%.
- Estado de Carga 6: se revisa el comportamiento de la zona intermedia inicial del vano 4 con resultados de flecha del 68,5% de la teórica y remanencia del 4,5%.
- Estado de Carga 7: de las mediciones se obtuvieron en el punto de control del vano central -56,1 mm y -52,5 mm en los bordes derecho e izquierdo del vano central y un desplazamiento teórico de .59 mm (92% de la deflexión teórica esperada).
- Estado de Carga 8: de las mediciones se obtuvieron en el punto de control en el centro de la luz del vano 1 los valores de deflexión de -10 mm y -2,4 mm en los bordes derecho e izquierdo y un desplazamiento teórico de -7 mm.
- Estado de Carga 9: de las mediciones se obtuvieron en el vano central -98,8 mm y -94,8 mm en los bordes derecho e izquierdo del vano central y un desplazamiento teórico de -106 mm y -105 mm (91%) de la deflexión teórica esperada).
- Estado de Carga 10: las mediciones obtenidas en el punto de control del vano 2 registró los valores de deflexión de -14,5 mm y -8 mm en los bordes derecho e izquierdo y un desplazamiento teórico de -6 mm (si se considera el error de medición del 2% de los instrumentos de medición se tendría un 138%). Considerando la magnitud de las

deflexiones a medir se observa buena correlación con los valores medidos y un desempeño acorde con lo esperado en el modelo matemático del vano 1 y del vano 2.

- Estado de Carga 11: de las mediciones en el vano central se obtuvieron -193,6 mm y -193,9 mm en los bordes derecho e izquierdo y un desplazamiento teórico de -192 mm (101% de la deflexión teórica esperada).
- Estado de Carga 12: de las mediciones en el vano central se obtuvieron -182,2 mm y -206,2 mm en los bordes izquierdo y derecho del vano central y un desplazamiento teórico de -203 mm y -181 mm.

Los resultados de la Prueba de Carga Estática fueron satisfactorios y se detectó la gran influencia de la temperatura, tomando las acciones necesarias para corregir este parámetro en el desarrollo de las pruebas.

**Prueba de Carga Dinámica:** La Prueba de Carga Dinámica consistió en el paso de un camión de 32 Ton a una velocidad entre 30 y 40 Km/hr, sobre un tablón dispuesto en cinco (5) sitios diferente con la medición de cinco (5) acelerógrafos dispuestos en puntos fijo para registrar las aceleraciones y deformaciones verticales, que se transformaron en frecuencias de vibración del tablero, para compararse con las teóricas aportadas en el documento de diseño de las pruebas de carga estática y dinámica mencionado.

El sentido de recorrido del camión se realizó de estribo 2 a estribo 1, por recomendación de mejor control de velocidad en ascenso por la pendiente longitudinal del +3% que en sentido contrario; lo que implicaría acción de frenado para conservar velocidad constante del camión. En los planos se referencia en sentido de Estribo 1 a Estribo 2.

El equipo de medición estuvo ajustado al protocolo aprobado, utilizando acelerógrafos AMS, con capacidad de medir bajas frecuencias en rangos micro-G, una unidad multicanal de adquisición de datos Alber 24 y DY, y software para el procesamiento de datos Dymasoft.

Tabla 27  
*Estados de Carga para Dinámica*

Fase	Posición	X (m)
1	Centro Vano 4	363,75
2	Vano 5	606,25
3	Vano 3	127,25
4	Intermedia Inicial Vano 4	298,0
5	Intermedia final Vano 4	428,0

De acuerdo a la medición en los cinco estados de carga dinámica se obtuvieron los siguientes resultados:

- Estado de Carga Dinámica 1: posición de tablón para resalto en abscisa 363,75 m centro de vano 4 luz principal, frecuencia AC1 inicial: 0,745 Hz; frecuencia AC1 final: 0,688 Hz. La frecuencia medida tiene correlación con el modo 9 de  $f = 0,642$  Hz.
- Estado de Carga Dinámica 2: posición de tablón para resalto en abscisa 606,25 m vano 5, frecuencia AC2 inicial: 0,30 Hz; frecuencia AC2 final: 0,273 Hz. La frecuencia medida tiene correlación con el modo 3 de  $f = 0,260$  Hz.
- Estado de Carga Dinámica 3: posición de tablón para resalto en abscisa 127,25 m vano 3, frecuencia AC3 inicial: 0,275 Hz; frecuencia AC3 final: 0,277 Hz. La frecuencia medida tiene correlación con el modo 3 de  $f = 0,260$  Hz.

- Estado de Carga Dinámica 4: posición de tablón para resalto en abscisa 298,4 m intermedio inicial vano 4, frecuencia AC4 inicial: 0,280 Hz; frecuencia AC4 final: 0,271 Hz. La frecuencia medida tiene correlación con el modo 3 de  $f = 0,260$  Hz.
- Estado de Carga Dinámica 5: posición de tablón para resalto en abscisa 428 m intermedio final vano 4, frecuencia AC5 inicial: 0,277 Hz; frecuencia AC5 final: 0,297 Hz. La frecuencia medida tiene correlación con el modo 4 de  $f = 0,304$  Hz.
- El amortiguamiento crítico, determinado por el método del decremento logarítmico fue de  $\xi = 0,60\%$ ; valor que se encuentra en entre el rango de 0,23% y 0,70% determinado en el estudio de túnel del viento.

En concepto de la supervisión del puente Hisgaura, se puede concluir que:

El protocolo de prueba de carga dinámica se aplicó de acuerdo a lo establecido por el diseñador.

Los modos de vibración determinados, tienen buena correlación con los principales modos de vibración vertical: los modos 3, 4 y 9.

El valor medio del amortiguamiento crítico está conforme a lo determinado en el estudio de túnel del viento.

Los valores de frecuencia medidos en la prueba dinámica, guardan correspondencia con los calculados en el modelo de análisis.

Basado en lo anterior se considera satisfactoria la prueba de carga dinámica.

Las pruebas de carga estática y dinámica realizadas, forman parte la línea base para el control de la salud estructural del puente Hisgaura, como punto de referencia inicial, en conjunto con los documentos, memorias, planos de diseño y construcción y validación estructural.

Los resultados satisfactorios de la Prueba de Carga Estática pueden ser consultados en el documento de Pedelta, información que fue entregada a Fondo adaptación: NOTA TÉCNICA 123 PUENTE HISGAURA EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA REALIZADA LOS DIAS 4,5,6,Y 7 DE DICIEMBRE DE 2018

Los resultados de la Prueba de Carga Dinámica pueden ser consultados en el documento Sisgeo No. SISLA 181217 INFORME TÉCNICO PRUEBA DE CARGA DINÁMICA PUENTE HISGAURA SAN ANDRÉS-COLOMBIA

Igualmente se puede consultar el documento de Pedelta: NOTA TÉCNICA 124 PUENTE HISGAURA EVALUACIÓN DE RESULTADOS DE PRUEBA DE CARGA DINÁMICA REALIZADA EL DÍA 7 DE DICIEMBRE DE 2018.

#### 4. Conclusiones

El sistema de monitoreo de Puentes atirantados, para el control de la salud estructural, va más allá del monitoreo para puentes convencionales, en razón a la magnitud y cantidad de los elementos estructurales, sobre los cuales se debe ejercer observación permanente en pilas, cables, tablero, cimentaciones, estribos, de los que se obtienen información respecto a inclinaciones, tensión o carga en cables, temperatura en pilas, tablero, cables, deformaciones y mediciones ambientales de vientos, sismo, clima de ser el caso. Es muy ventajoso que el Sistema de Monitoreo sea automatizado con un buen soporte de software de adquisición y de gestión de datos y de comunicaciones, para recibo de información en tiempo real, con las frecuencias de toma de datos y en unidades de medida físicas de los dispositivos de detección.

Importante que los diseños de puentes atirantados incorporen plataformas o equipos accesorios, que permitan una observación cercana a la estructura, cuando se trata de complementar la información requerida en la salud estructural, respecto a medición de fisuras, carbonatación del concreto, corrosión y mantenimiento.

Los desarrollos tecnológicos en dispositivos, sean electrónicos, laser, fibra óptico y los equipos de recepción y transmisión de datos con el soporte de un software y comunicaciones de gestión de datos, posibilitan aplicar estas herramientas en puentes, sean convencionales, atirantados o colgantes, de acero, concreto o mixtos. La inversión del monitoreo del Puente Hisgaura fue del 2% del valor de la estructura, esto son 1917 millones COP (US\$ 563.800,00) del año 2018, que podría subir al 2,1% si se incluyeran acelerómetros y deformímetros de hilo vibrátil.

La experiencia particular con el Monitoreo del Puente Hisgaura, demuestra que se está recibiendo datos de medición a distancia y en tiempo real cada 15 minutos de tiempo, sobre tensión de celdas de carga en KN, inclinaciones de torres en segundos, temperaturas en °C; la cual es básica para medir el comportamiento estructural, y de acuerdo a los planes de actuación por las alarmas que genere el sistema, se pueda estar realizando un control de salud estructural que armonice las actividades de mantenimiento y durabilidad de la estructura.

Las condiciones para realizar un control del comportamiento del puente Hisgaura, están dadas con la información definida en su línea base, que incluye el diseño, planos de construcción, plan de mantenimiento, pruebas de carga estática y dinámica y validación del diseño.

La información reportada por el sistema diariamente, está garantizando el correcto funcionamiento de los elementos monitoreados.

Las experiencia de México con la aplicación del sistema de monitoreo de puentes y de China con sus seis módulos integrados, y de otros países que han realizado investigaciones y aplicaciones de monitoreo; son un punto de referencia para que Colombia enfoque sus planes de mantenimiento de puentes bajo esa óptica y se adentre en la tendencia de administración y mantenimiento de puentes con la implementación de los monitoreos para la salud estructural, cuyo éxito depende del análisis e interpretación de la información recibida del sistema d administración de datos de los sensores instalados, aplicando metodologías de detección de daños, para generar programas de actuación con el fin de asegurar la integridad de la estructura y garantizar la seguridad a los usuarios.

El sistema de monitoreo instalado en el Puente Hisgaura en Santander, requiere del seguimiento de la información de datos específicos que entrega actualmente y en tiempo real el sistema, en cuanto a verticalidad de las pilas, tensión en celdas de tirantes y temperatura en tablero, pilas y tirantes; para lo cual la autoridad nacional competente, debe implementar y aplicar las metodologías pertinentes a fin de generar los planes de actuación y asegurar la salud estructural del puente.

Teniendo en cuenta que el sismo es la amenaza natural principal en la región, sería deseable la inclusión de acelerómetros en el sistema de monitoreo permanente con registro continuo.

### Referencias Bibliográficas

- Antonio, J., & Rodríguez, Q. (2016). *Sistema Inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes*. (464).
- CAICEDO, L. S. (2014). *Redistribución de esfuerzos en puentes atirantados por cambios de tensiones en los cables. caso puente gilberto echeverri, 4 sur lucas seña caicedo*.
- Carrión, F. J., José, V., Hernández Jiménez, R., & Guillén, J. T. (2005). Estudio Experimental De Un Puente Atirantado Evaluación De Cables. *Mexican Transportation Institute*, (265).
- Carrión Viramontes Francisco, Quintana Rodríguez Juan, López López José, Orozco Orozco Pablo, M. J. J. (2010). *MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PUENTE ATIRANTADO DURANTE SU REHABILITACIÓN*.
- Chang, S., Yee, J., Lee, J., Chang, S., Yee, J., & Lee, J. (2009). *Necessity of the bridge health monitoring system to mitigate natural and man-made disasters*. 2479. <https://doi.org/10.1080/15732470601130378>
- Chung-Bang Yun, Soojin Cho, Hyun-Jun Park, J. M. & J.-W. P. (2014). Smart wireless sensing and assessment for civil infrastructure. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 10, p. 4. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.769011>
- Del Grosso, A., Torre, A., Inaudi, D., Brunetti, G., & Pietrogrande, A. (2006). Monitoring system for a cable-stayed bridge using static and dynamic fiber optic sensors. *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure: Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Nov. 16-18, 2005, Shenzhen, China, 1(March), 415. Retrieved from <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=oKw9leF9w50C&oi=fnd&mp;pg=PA415&dq=Monitoring+System+for+a+Cable-Stayed+Bridge+using+static+and+dynamic+Fiber+Optic+Sensors&ots=Sy2zhnKyTd&sig=Wui2TCPtILwMxOm9dlkk8o7BWU>
- Diego Rubio Peiróten. (2010). *MÉTODOS DE DEFINICIÓN DE CARGAS EN TIRANTES EN PUENTES ATIRANTADOS*. 47.
- Esteban, J., & Marín, M. (2016). *Metodología para el diseño preliminar de sistemas de diagnóstico estructural : conceptos , recomendaciones y aplicaciones para puentes*.
- Felipe, A., Parra, Q., & Mejía, R. V. (2010). ESTADO DEL ARTE EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL: UN ENFOQUE BASADO EN AGENTES INTELIGENTES *struCtural Health mOnitOring: an intelligent agent aPPrOaCH*. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 117–132. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v20n1/v20n1a08.pdf>
- Fujino, Y., & Siringoringo, D. M. (2011). *Bridge monitoring in Japan : the needs and strategies*. 2479. <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.498282>

- Furgang, Hernandez, K. & F. (2011). Construcción de puentes. *Benchmark Education Company*, 191–233.
- Gómez Araujo, I., Maldonado, E., & Chio Cho, G. (2010). Pruebas de vibración ambiental en puentes. *Revista UIS Ingenierías*, 9(1), 55–68.
- Guerrero Puente César Alejandro. (2012). *FALLA Y REPARACIÓN DEL PUENTE VEHICULAR ATIRANTADO “REPÚBLICA FEDERAL” TRAS EL SISMO DEL 20 DE MARZO DEL 2012*. (499), 1–10.
- Hernández-Castañeda, O., & Mendoza-Escobedo, C. J. (2018). Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 7(1), 57–70. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2006.07n1.005>
- Ing. Yi Cheng Liu Kuan, Unidad de Puentes, P.-L. (2014). *Nuevas prácticas en la evaluación de estructuras de puentes. Uso de tecnologías de instrumentación y auscultación de estructuras de puentes*. 1–3.
- Jang, S. A., & University of Illinois at Urbana-Champaign. (2010). *Structural health monitoring for bridge structures using wireless smart sensors*. (May).
- Juan Antonio Quintana Rodríguez<sup>1</sup>, F. J. C. V. (2014). *ESTRATEGIAS DE EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DEL MONITOREO DEL PUENTE RÍO PAPALOAPAN*. (442), 1–10.
- Julio A. León Deza (P), C. J. M. P. (2018). *ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL PUENTE ATIRANTADO RAYITOS DE SOL MEDIANTE VIBRACIONES AMBIENTALES*. (May 2019), 0–9.
- Ko, J. M., Ni, Y. Q., Zhou, H. F., Wang, J. Y., Zhou, X. T., Ni, Y. Q., ... Investigation, X. T. Z. (2009). *Investigation concerning structural health monitoring of an instrumented cable-stayed bridge*. 2479. <https://doi.org/10.1080/15732470701627893>
- Kuan, E. L. N. de M. y M. P.-P. Y. C. L. (2013). *MONITOREO Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PUENTES UTILIZANDO UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN INALÁMBRICO* Unidad de Puentes. Retrieved from [https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1382/LM-PI-UP-02-2013Monitoreo y evaluaci3n estructural de puentes utilizando un sistema de instrumentaci3n inal%C3%A1mbrico.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1382/LM-PI-UP-02-2013Monitoreo%20y%20evaluaci3n%20estructural%20de%20puentes%20utilizando%20un%20sistema%20de%20instrumentaci3n%20inal%C3%A1mbrico.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Li, H., Li, S., Ou, J., & Li, H. (2012). *Reliability assessment of cable-stayed bridges based on structural health monitoring techniques*. 2479. <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.496856>
- Luis, J., Ospina, C., Alberto, C., & Jerez, R. (2013). *DETECCIÓN DE DAÑOS EN PUENTES DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO ALGORITMOS DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES ESTADÍSTICOS AUTOREGRESIVOS*. 95–103.
- Mateo López Lara tito, A. G. A. (2015). *Propuesta metodológica para evaluar la capacidad de carga de tableros de puentes existentes de concreto reforzado basada en pruebas estáticas de carga* (Vol. 3). Pontificia Universidad Javeriana.

- Muñoz, E., Nunez, F., Rodríguez, J. A., Ramos, A., & Otálora, C. (2010). Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente atirantado basados en confiabilidad estructural. *Revista Ingeniería de Construcción*, 25(2), 285–323. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732010000200006>
- Navarro-henríquez, F. (2014). *Sensores de fibra óptica FBG para el monitoreo de la salud estructural de los puentes Structural Health Monitoring of Bridges with Fiber Bragg Grating Sensors*. 27(506), 3–13. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5001534.pdf>
- Nguyen, K. D., Kim, J. T., & Park, Y. H. (2013). Long-term vibration monitoring of cable-stayed bridge using wireless sensor network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/804516>
- Olazábal Herrero Patricia. (2013). *TESIS DOCTORAL. LA INSTRUMENTACIÓN : UNA NUEVA FORMA DE COMPRENDER LOS PUENTES*.
- Ortega, L., López, A., & Velando, C. (2013). *La conservación de puentes atirantados : necesidad de planes de mantenimiento y técnicas de actuación específicas*. 1–13.
- Swartz, R. A., & Lynch, J. P. (2009). *Wireless sensors and networks for structural health monitoring of civil infrastructure systems*.
- Thomson, P., Ph, D., D, J. M. A. P., & Valle, U. (2000). *Monitoreo de salud estructural \**. (2), 40–47.
- Viloria Ramírez, G. P. (2017). *Sistemas de instrumentacion de monitoreo de puentes*. UIS.
- Viviescas Jaimes, A., Carrillo León, W. J., & Vargas Carvajal, L. A. (2018). Línea base para el monitoreo de salud estructural del puente Gómez Ortiz a partir de pruebas de vibración ambiental. *Inge Cuc*, 14(1), 52–65. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.05>
- Wong, K., & Wong, K. (2007). *Design of a structural health monitoring system for long-span bridges Design of a structural health monitoring system for long-span bridges*. 2479. <https://doi.org/10.1080/15732470600591117>
- Zhang, Q., & Zhou, Y. (2007). *Investigation of the applicability of current bridge health monitoring technology Investigation of the applicability of current bridge health monitoring technology*. 2479. <https://doi.org/10.1080/15732470600590762>

