



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Monitoreo Estructural del Acueducto de Querétaro durante la ampliación del Boulevard Bernardo Quintana

Saúl Enrique Crespo Sánchez
Francisco Javier Carrión Viramontes
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Jorge Hernández Figueroa
Roberto Alvarado Cárdenas
Daniel Rodríguez Naranjo
Héctor Miguel Gasca Zamora

**Publicación Técnica No. 418
Sanfandila, Qro. 2014**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Monitoreo de los Arcos del Acueducto de
Querétaro durante la ampliación del Boulevard
Bernardo Quintana**

Publicación Técnica No. 418
Sanfandila, Qro. 2014

El presente trabajo fue desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte bajo la supervisión del Dr. Francisco Carrión Viramontes, la dirección del M. en C. Saúl Enrique Crespo Sánchez, y la participación de los siguientes investigadores: Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, el M. en C. Daniel Rodríguez Naranjo y el L. en I. Héctor Gasca Zamora.

Se reconoce la participación del M. en C. Roberto Alvarado Cárdenas en la gestión y vinculación del proyecto con el Gobierno del Estado de Querétaro.

Se agradece la colaboración del Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos, el M en C. David Vázquez Vega, el M. en C. José Ricardo Hernández Jiménez, el M. en C Oscar Flores Centeno y el Dr. José Alfredo López López; así como, los valiosos comentarios del Dr. Miguel Martínez Madrid.

Así como de los asistentes de investigación: M. en C. Daniel Arceo, M. en C. Ricardo García Salas, Ing. Andrea Lascurain, Ing. Erick Duran Tinajero y el Ing. Miguel Sánchez Ojeda, como la participación del Tec. Mario Montes Zea.

Finalmente, se agradece al Gobierno del Estado de Querétaro y, en especial, a la Subsecretaría de Proyectos y Construcción de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obra Pública, por su valiosa colaboración y confianza que mostraron para el desarrollo del proyecto y para la realización de los análisis aquí presentados.

Contenido

Resumen		vii
Abstract		ix
Resumen	ejecutivo	xi
Capítulo 1	Introducción	1
Capítulo 2	Diseño del sistema de monitoreo estructural	5
Capítulo 3	Instrumentación del acueducto	13
Capítulo 4	Monitoreo estructural del acueducto	23
Capítulo 5	Resultados	34
Capítulo 6	Conclusiones	38
Capítulo 7	Bibliografía	39
Apéndice A	Criterios de indicadores de monitoreo para la seguridad estructural de acueducto durante el proceso constructivo del gran paso acueducto	41

Índice de tablas y figuras

Fig. 1	Sistema de aseguramiento temporal del acueducto (SDUOP, Gobierno del Estado de Querétaro)	1
Fig. 2	Pilotes de confinamiento en pilares (SDUOP, Gobierno del Estado de Querétaro)	2
Fig. 3	Pilotes tangentes de contención y apoyo (SDUOP, Gobierno del Estado de Querétaro)	3
Fig. 4	Pilotes de confinamiento en pilares (SDUOP, Gobierno del Estado de Querétaro)	3
Fig. 5	Pilotes de contención y de apoyo de cabezales (SDUOP, Gobierno del Estado de Querétaro)	4
Fig. 6	Esquema de instrumentación en primera etapa	5
Fig. 7	Esquema de instrumentación en segunda etapa	6
Fig. 8	Diagrama de conexión de los sensores empleados en primera etapa de instrumentación	7
Fig. 9	Acelerómetro piezoeléctrico CBM 2000	8
Fig. 10	Acondicionamiento de señal Kistler 5118B2	8
Fig. 12	Diagrama de conexión de los sensores empleados en segunda etapa de instrumentación	9
Fig. 13	Acelerómetro os7100 Micron Optics	10
Fig. 14	Extensómetro os3610 Micron Optics	10
Fig. 15	FBG-TI-310 Inclinómetro	11
Fig. 16	Interrogador sm130 Micron Optics	11
Fig. 17	Multiplexor sm041 Micron Optics	11
Tabla 1	Nomenclatura de los Sensores	13
Fig. 18	Acelerómetros CBM arco 26-27	14
Fig. 19	Acelerómetros CBM arco 27-28	14
Fig. 20	Acelerómetros Crossbow en pila 26	15

Fig. 21	Acelerómetros Crossbow en pila 27	15
Fig. 22	Acelerómetros Crossbow en pila 28	15
Fig. 23	Acelerómetros Crossbow en pila 29	15
Fig. 24	Equipo de adquisición instalado en la cabina de monitoreo	16
Tabla 2	Acelerómetros instalados	16
Tabla 3	Inclinómetros instalados	17
Tabla 4	Extensómetros instalados	17
Fig. 25	Caja de empalme (interior)	18
Fig. 26	Cajas de empalme sobre el canal	18
Fig. 27	Acelerómetros instalados en el acueducto	19
Fig. 28	Extensómetros instalados en el acueducto	20
Fig. 29	Inclinómetros instalados en el acueducto	21
Fig. 30	Interrogador y multiplexor para fibra óptica instalados en caseta de monitoreo	22
Fig. 31	Adquisición de las señales	24
Fig. 32	Registros máximos diarios	25
Fig. 33	Semáforo de alarmas de seguridad estructural	25
Fig. 34	Interfaz de aplicación para la generación de reportes automáticos	26
Fig. 35	Deformaciones unitarias en extensómetros del centro de Arco durante 72 horas.	27
Fig. 36	Diagrama de flujo y operación de datos para la generación de los reportes	27
Fig. 37	Aplicación de reportes automáticos	28
Fig. 38	Red de datos en sitio de monitoreo	29
Fig. 39	Entrada a Página Web desarrollada	30
Fig. 40	Página principal	30

Fig. 41	Página con la información de los equipos	31
Fig. 42	Excavación de zanja para colocación de ducto de concreto en arco central	32
Fig. 43	Perforación en perímetro de pilas para el colado de micropilotes de concreto reforzado colado in situ	32
Fig. 44	Colado de micropilotes de concreto reforzado	33
Fig. 45	(a) Excavación en arco central. (b) Perforación en pilas, (c) Renivelación	34
Tabla 5	Aceleraciones registradas en eventos registrados durante la obra	35
Fig. 46	Magnitudes de aceleraciones máximas registradas	35
Fig. 47	Espectros frecuencia amplitud de datos de acelerómetro en arco central	36
Fig. 48	Gradientes de deformación entre sensores de deformación en centro de arcos.	37

Resumen

Ante los bajos niveles de servicio, alto flujo vehicular y pérdida de la capacidad vial de la intersección del Boulevard Bernardo Quintana y Avenida de Los Arcos, en la ciudad de Querétaro, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas del Gobierno del Estado planteó la ampliación de los túneles del Boulevard como la alternativa para agilizar la movilidad vehicular de la zona. La materialización de alguna solución debía considerar, necesariamente -y por requisitos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)-, la preservación del acueducto de Querétaro, monumento histórico patrimonio cultural que, por estudios previos, había mostrado ser susceptible a cualquier intervención en la zona circundante. Finalmente, como el proyecto propuesto involucraba trabajos de recimentación y demolición, para garantizar la integridad del acueducto, las autoridades estatales requirieron de un sistema de monitoreo estructural (SHM) que evaluara el comportamiento dinámico de los arcos y midiera el impacto de las obras en sus diferentes etapas para prevenir condiciones de excesiva vibración o detectar situaciones que pusieran en riesgo su integridad estructural. El sistema SHM fue diseñado en una configuración híbrida que incluyó acelerómetros piezoeléctricos y capacitivos, así como instrumentación basada en sensores de fibra óptica tipo FBG para medir inclinaciones, deformaciones, aceleración y temperatura. El monitoreo estructural se realizó durante 5 meses en 5 etapas y el sistema fue diseñado con un sub-sistema de alarmas para, en caso de detección de condiciones críticas, avisar a los responsables de la obra para implementar acciones correctivas. Este sistema incluyó, además, el análisis de vibraciones y del comportamiento del monumento, para determinar el efecto de los cambios generados por la obra civil en el sistema estructural del acueducto. El sistema mostró su efectividad y utilidad, particularmente en 5 ocasiones en que los niveles de vibración fueron excesivos y originaron modificaciones al plan de trabajo.

Palabras clave

Monitoreo estructural, evaluación de monumentos históricos, análisis estructural

Abstract

Due to the low service levels, high traffic and loss of capacity at the intersection of Bernardo Quintana Boulevard and Los Arcos Avenue, in the City of Queretaro, the Urban Development and Public Works Ministry of the state, proposed the expansion of the tunnels of the Boulevard as a solution to increase vehicular mobility in the area. The realization of any solution should consider, necessarily and by requirement of the National Institute of Anthropology and History (INAH), the preservation of the Aqueduct of Queretaro, historic monument and cultural heritage that, from previous studies, it was demonstrated to be very sensitive to any kind of intervention in the surroundings. At the end, the planned project involved works in the foundations and demolition, to warranty the Aqueduct integrity, the state authorities required a structural health monitoring system (SHM) to evaluate the dynamic behavior of the arches and to measure the work's impact during its different stages, this to prevent extreme conditions that could jeopardize their structural integrity. The SHM system was designed in a hybrid configuration that included piezoelectric and capacitive accelerometers, as well as instrumentation based on fiber optics FBG sensors for tilt, strain, acceleration and temperature measurements. The Structural monitoring was performed during 5 months for 5 different stages and the system was designed with an alarm sub-system to, when critical conditions were detected, to warn those responsible for the work and to implement corrective actions. This system also included the vibration and structural behavior of the monument to determine the effects on the aqueduct structure due to the changes from to the project. The SHM system demonstrated its effectiveness and usefulness, specially in 5 occasions when vibration limits were excessive and originated changes in the work plan.

Keywords

Structural Monitoring, Heritage structures evaluation, structural analysis

Resumen ejecutivo

Muchos movimientos de tierras, como son la colocación de pilotes, la compactación vibratoria de masas de suelo, y en general, el movimiento de maquinaria pesada de construcción, produce vibraciones que pueden ser transmitidas a las estructuras de suelo cercanas. Es debido a estas vibraciones y a las fuerzas dinámicas resultantes que puede producirse daño en los sistemas estructurales y por ello, es que en el diseño y la planificación de las actividades de una obra civil se evalúe el efecto potencial de estas vibraciones en las estructuras adyacentes y moderar la vibración con el fin de minimizar los efectos sobre las estructuras. Los efectos de la vibración inducida por maquinaria de construcción, depende de factores como la intensidad de la fuente de vibración, las diferencias en la estructura del suelo entre la fuente y el sistema estructural, la calidad de la cimentación y en general, de la calidad de los materiales de construcción (Lubej, 2010). En sistemas estructurales que forman parte de edificios históricos, la evaluación de la respuesta dinámica merece un análisis cuidadoso, porque cargas frecuentes pueden aumentar la vulnerabilidad estructural de los elementos dañados y/o deteriorados. Por ejemplo, en edificios históricos construidos a base de mampostería de piedra antigua, la vibración con un elevado número de ciclos lleva a una reducción de la resistencia de la mampostería debido al deterioro del mortero, causando así, desprendimientos. Debido a esto, la evaluación de sistemas estructurales históricos sujetos a cargas dinámicas moderadas, resulta una exigencia de gran importancia (Monti, 2010).

Para la conservación de las estructuras históricas es cada vez más necesario comprender los procesos de deterioro causados por el ambiente o por las condiciones de carga. En algunos casos, se han implementado sistemas de monitoreo estructural continuo para obtener información acerca de los procesos de deterioro estructural en estos sistemas (Grosse, 2010)

La correcta implementación de estos sistemas ha mostrado ser una herramienta eficaz en la detección de condiciones indeseables, en la evaluación estructural y en la detección de daño en las estructuras de países que albergan recintos históricos y que forman parte del patrimonio cultural de la humanidad, ejemplos de ello son el Coliseo romano (Monti, 2010), sistemas estructurales de iglesias bizantinas griegas del Siglo XI al XIX (Manos, 2010) y templos en Bélgica (Verstrynge, 2010), Francia (Piot, 2010) e Italia (Cimellaro, 2013).

En México, se han realizado algunos trabajos de rehabilitación en la Catedral y el Palacio Nacional de la Ciudad de México, en los cuales se llevó a cabo el monitoreo de algunas variables como asentamientos y aceleraciones durante las obras de rehabilitación, esto para garantizar la integridad estructural durante las intervenciones, siendo éstas a largo plazo (Rivera, et al. 2008; Santoyo, 1999).

Ante la necesidad de ampliar la capacidad de tránsito en el Boulevard Bernardo Quintana en la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas del Estado de Querétaro inició en agosto del año 2012, la obra para ampliar la capacidad de 2 a 3 carriles en los túneles centrales de Bernardo Quintana, a la altura del cruce con Av. Los Arcos. Esta obra, por su naturaleza misma y fundamentada en estudios previos, propuso una serie de acciones para asegurar la cimentación de las pilas de los arcos del acueducto de Querétaro para no comprometer su integridad durante dichos trabajos de ampliación.

El proyecto propuesto involucró trabajos de recimentación y demolición. Para garantizar la integridad del acueducto las autoridades estatales requirieron de un sistema de monitoreo estructural (SHM) que evaluara el comportamiento dinámico de los arcos y midiera el impacto de las obras en sus diferentes etapas para prevenir condiciones de excesiva vibración o detectar situaciones que pusieran en riesgo su integridad estructural. El sistema SHM fue diseñado en una configuración híbrida que incluyó acelerómetros piezoeléctricos y capacitivos, así como instrumentación basada en sensores de fibra óptica tipo FBG para medir inclinaciones, deformaciones, aceleración y temperatura. El monitoreo estructural se realizó durante 5 meses en 5 etapas y el sistema fue diseñado con un sub-sistema de alarmas para, en caso de detección de condiciones críticas, avisar a los responsables de la obra para implementar acciones correctivas.

El sistema mostró su efectividad y utilidad, particularmente en 5 ocasiones en que los niveles de vibración fueron excesivos y originaron modificaciones al plan de trabajo.

1 Introducción

La intersección del Boulevard Bernardo Quintana con la Calzada de los Arcos presentaba diversos problemas, entre los que se encontraban: bajos niveles de servicio, movimientos saturados, alto flujo vehicular, disminución de la capacidad vial debido a la reducción de carriles en la intersección y una amplia demanda vehicular, entre otros. Al respecto la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas del Gobierno del Estado de Querétaro planteó algunas alternativas de solución, entre las que barajaban la creación de nuevos túneles en arcos adyacentes, la creación de un nuevo paso a desnivel en el arco central y la ampliación de los túneles existentes. Después de analizar estas opciones, se optó por la ampliación de los túneles existentes como la alternativa de solución que permitiría agilizar la movilidad vehicular de la zona.

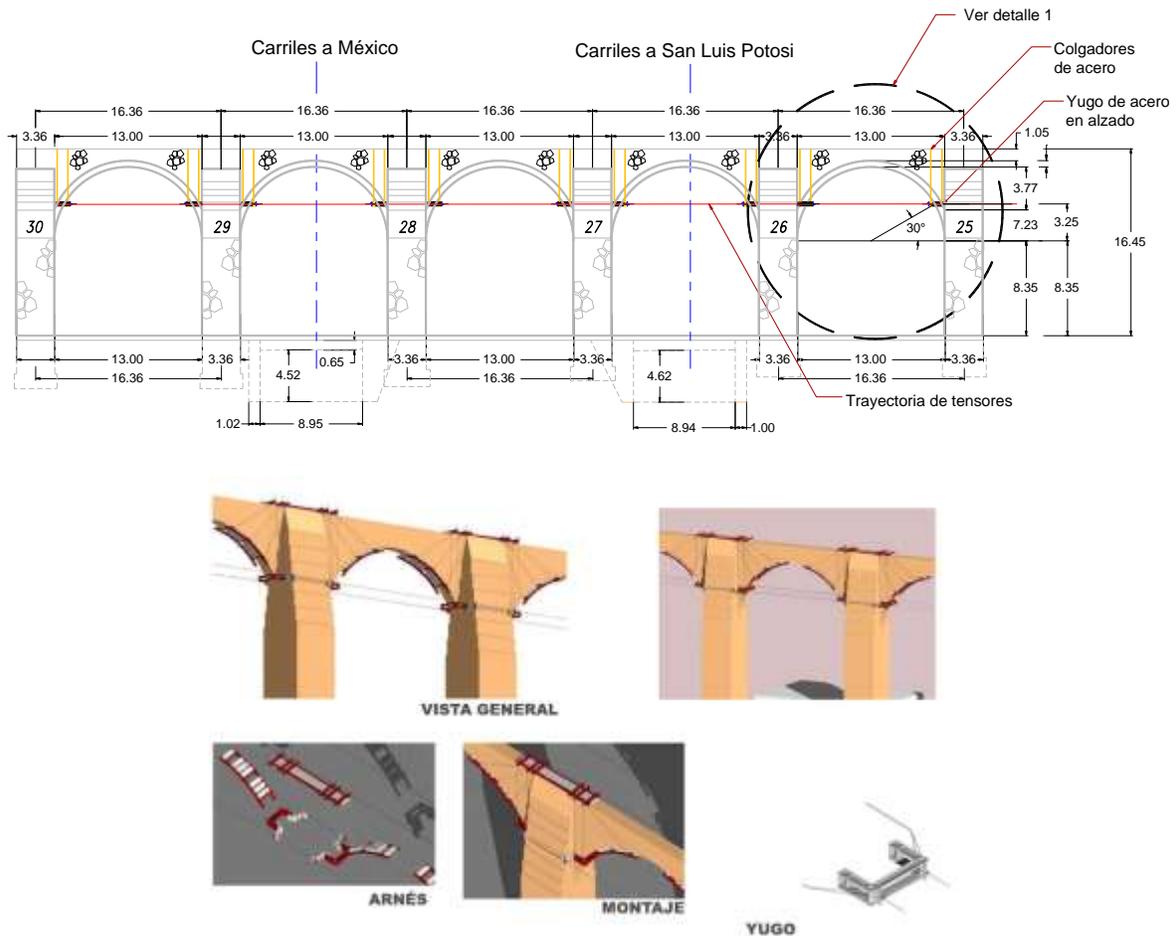


Figura 1. Sistema de aseguramiento temporal del acueducto (SDUOP, Gobierno del Estado de Querétaro)

Para la materialización de esta alternativa de solución, se comenzaron ciertas obras sobre la zona. Se inició con la remoción de masa vegetal y la reubicación de las líneas eléctricas, la consolidación preventiva del acueducto, la instalación del equipo de monitoreo, la construcción del dren cuesta china y el aseguramiento estructural del acueducto. Esta última actividad consistió en la colocación de un sistema auxiliar de tensores y arneses horizontales y verticales, los cuales proporcionarían rigidez a la zona de la arcada (Figura 1)

Dado que la solución propuesta fue la ampliación de los túneles existentes, esto conllevó a una serie de acciones para la realización de este objetivo. La solución involucraba la recimentación de las pilas y zonas adyacentes a los túneles, debido a que para la ampliación de los carriles es necesario demoler los muros de contención de los túneles. Para llevar a cabo la recimentación se construyeron pilas de confinamiento de la base de los pilares del acueducto (Figura 2).

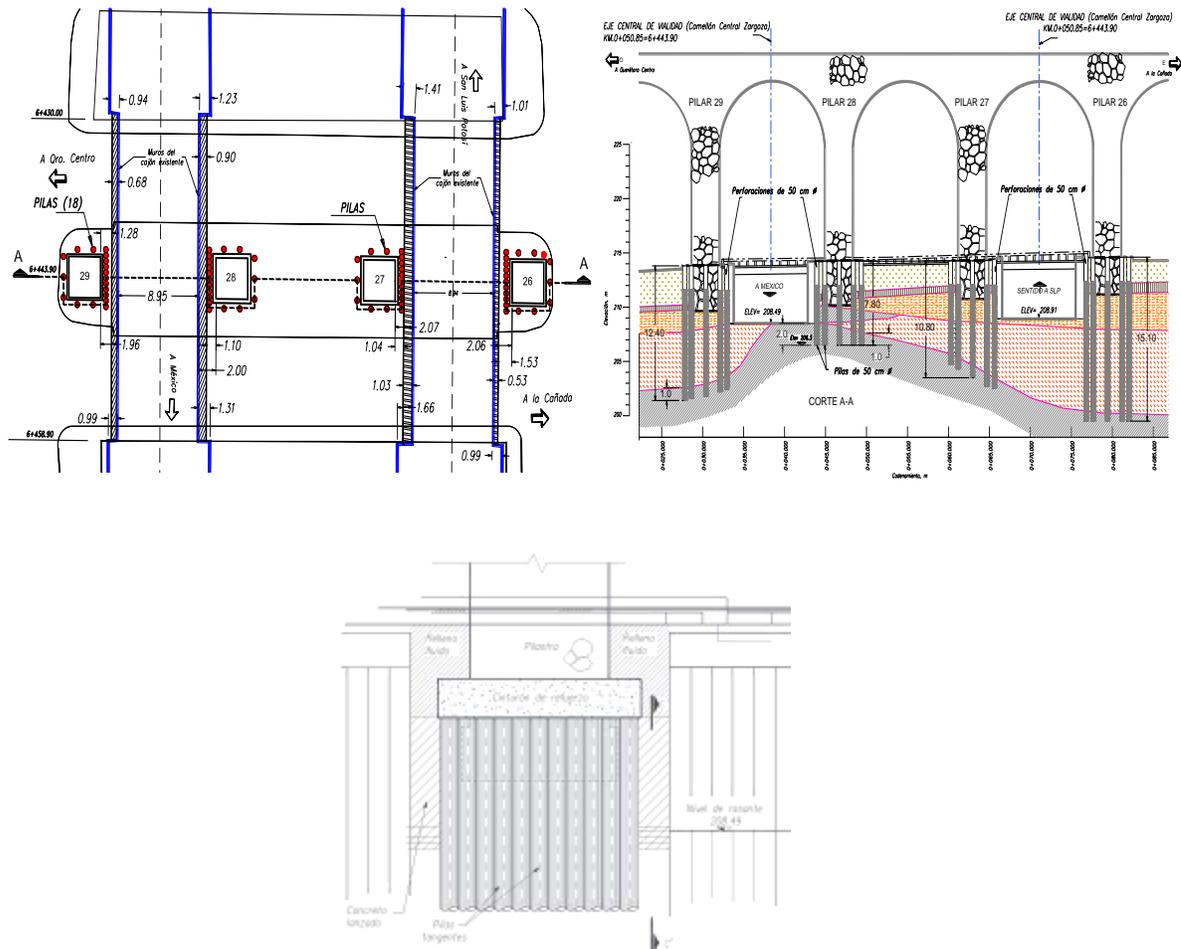


Figura 2. Pilotes de confinamiento en pilares (SDUOP, Gobierno del Estado de Querétaro)

Adicionalmente a estos micropilotes, se construyeron pilas tangentes de contención de 50 cm de diámetro y pilas de apoyo de cabezales de 60 cm de diámetro para la construcción de los puentes de la Calzada de los Arcos (Figura 3).

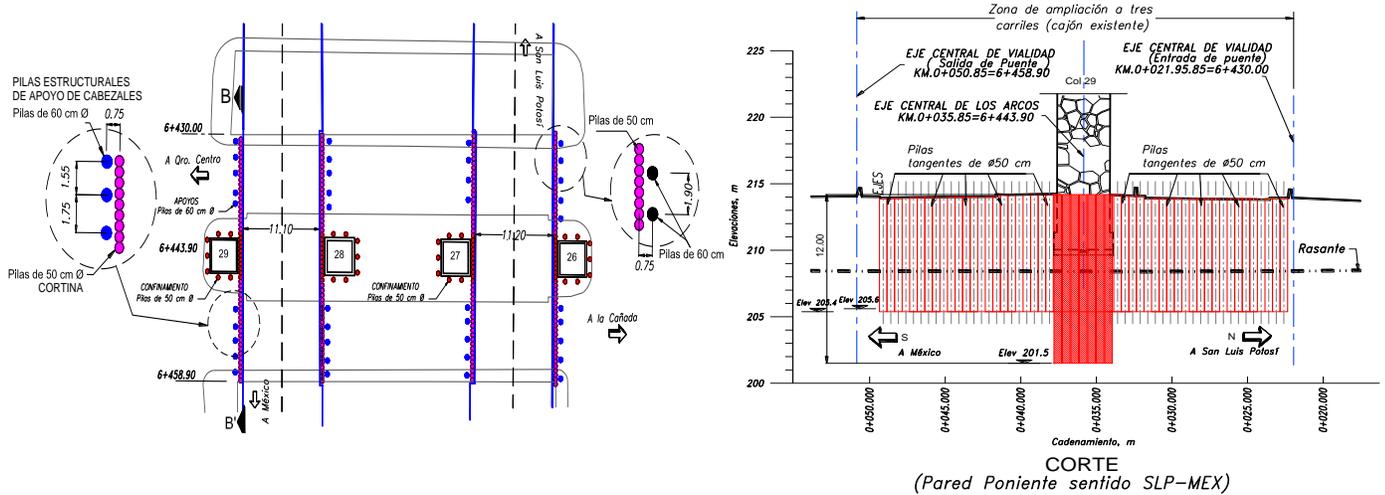


Figura 3. Pilotes tangentes de contención y apoyo (SDUOP, Gobierno del Estado de Querétaro)

El proceso constructivo inició con las perforaciones de los pilotes perimetrales en las pilas del acueducto para su posterior armado y colado *in situ* (Figura 4).

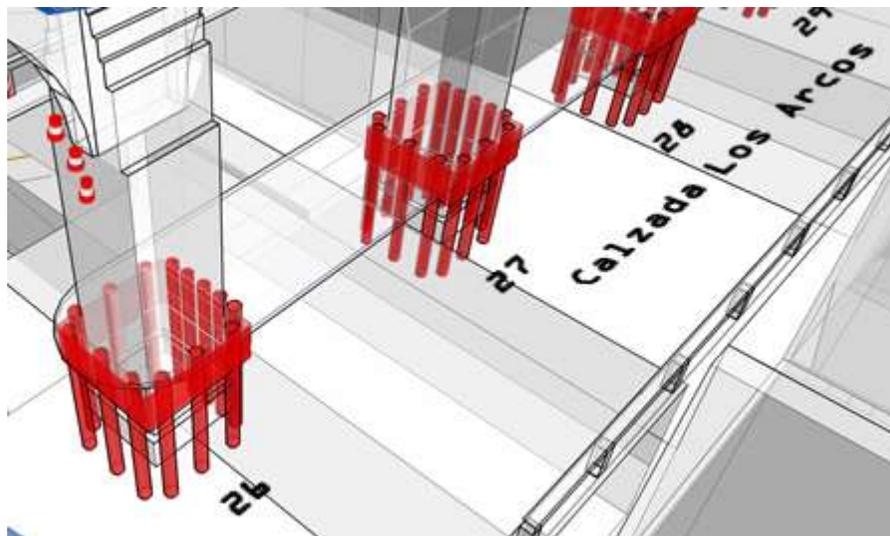


Figura 4. Pilotes de confinamiento en pilares (SDUOP, Gobierno del Estado de Querétaro)

Posteriormente se construyeron las pilas de contención y las pilas de apoyos de los cabezales. En la Figura 5 se muestra una virtualización de estos trabajos.

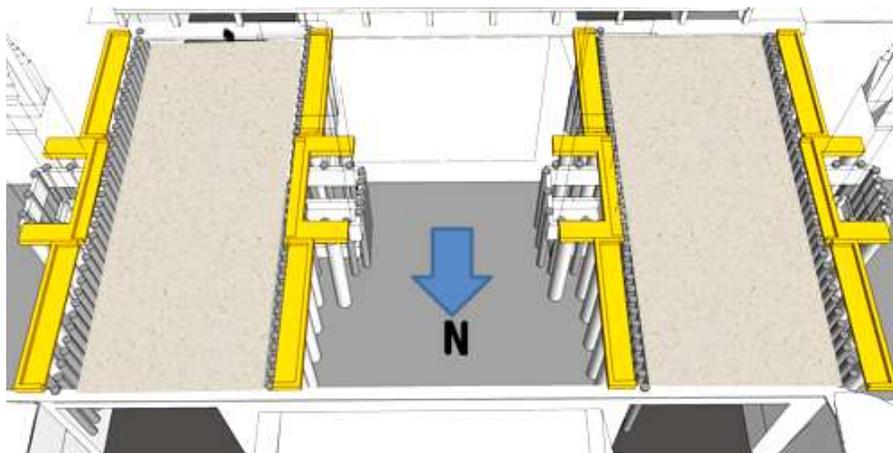


Figura 5. Pilotes de contención y de apoyo de cabezales (SDUOP, Gobierno del Estado de Querétaro)

Derivado de un estudio experimental de vibraciones que se realizó en el año de 2010, se encontró que el comportamiento dinámico estructural de los arcos del acueducto de Querétaro depende fuertemente de las vibraciones externas que ocasiona el tránsito vehicular. Con fundamento en estos estudios, se encontró que la estructura tiene un comportamiento no lineal, fuertemente influenciado por factores ambientales (temperatura y humedad) y por la interacción cimentación-suelo. Todo ello fue corroborado por el estudio mediante el cual se realizaron mediciones por 24 horas y se elaboró un modelo de simulación por elementos finitos calibrado y que fue utilizado para analizar los modos de vibrar y el efecto de las condiciones de frontera definidas por el tipo de suelo.

Ante la necesidad de ampliar la capacidad de tránsito en el Boulevard Bernardo Quintana, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas del Estado de Querétaro inició en agosto de este año 2012, la obra para ampliar la capacidad de 2 a 3 carriles en los túneles centrales de Bernardo Quintana, a la altura del cruce con Av. Los Arcos. Esta obra, por su naturaleza misma y fundamentada en estudios previos, propuso una serie de acciones para asegurar la cimentación de las pilas de los arcos del acueducto de Querétaro para no comprometer su integridad durante dichos trabajos de ampliación. En forma complementaria, se consideró instalar un sistema de monitoreo para evaluar el comportamiento dinámico de los arcos y medir el impacto de las obras en sus diferentes etapas para prevenir condiciones de excesiva vibración o detectar situaciones que pusieran en riesgo la integridad del monumento histórico de Querétaro.

2 Diseño del sistema de monitoreo estructural

El sistema de monitoreo se diseñó teniendo en cuenta tres objetivos fundamentales, que son los siguientes:

- Durante la obra de ampliación vial, medir el nivel de vibraciones en los puntos críticos de la estructura de los arcos de Querétaro.
- Advertir, mediante alarmas, la ocurrencia de condiciones de riesgo por niveles excesivos de vibraciones y, de ahí, poder considerar posibles modificaciones en los procesos o programas constructivos.
- Evaluar en el mediano plazo, mediante indicadores de condición estructural, la evolución de la estructura durante y después de la obra de ampliación y remodelación vial.

Considerando la instrumentación disponible y los tiempos para su instalación, el monitoreo de los arcos fue planeado en dos etapas:

1ª Etapa. Apoyada en un sistema de instrumentación principal, para cumplir con los dos primeros objetivos principales y fundamentales de evaluación y advertencia por las vibraciones inducidas por la obra de construcción, desde su inicio hasta su conclusión.

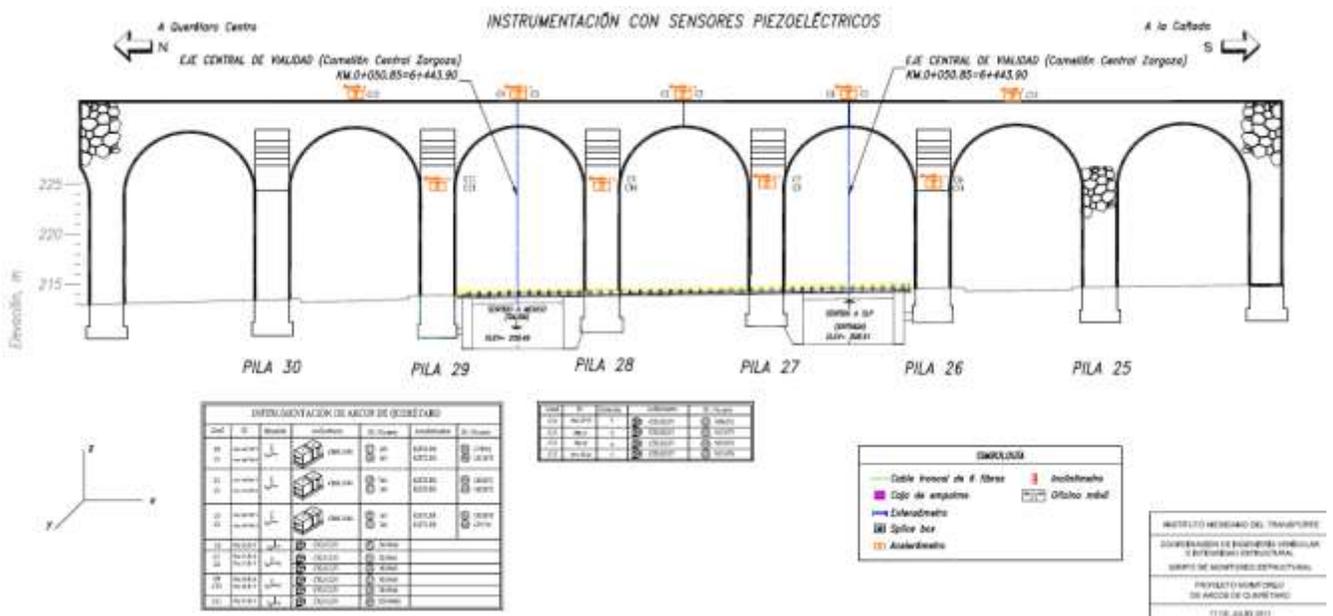


Figura 6. Esquema de instrumentación en primera etapa

2ª Etapa. Con base en el sistema principal y la integración del sistema de monitoreo complementario, para evaluar la evolución variables asociadas con los parámetros estructurales de los arcos (frecuencias de vibración, inclinación y deformaciones) y, con ello, identificar variaciones o tendencias que pudieran estar asociadas con algún tipo de efecto evolutivo, deterioro o daño que la obra de ampliación pudiera inducir (indicadores de la condición estructural), como pueden ser posibles asentamientos del suelo o el crecimiento de los agrietamientos en la estructura.

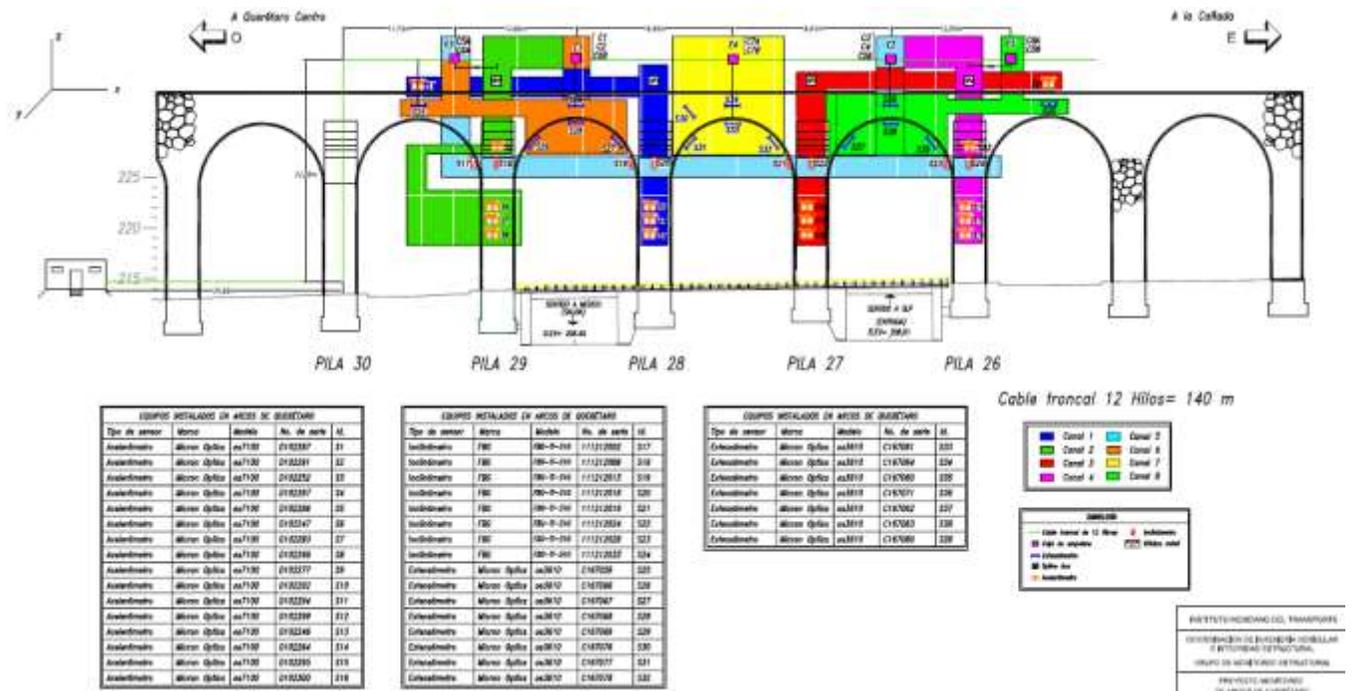


Figura 7. Esquema de instrumentación en segunda etapa

La estrategia de la primera etapa se diseñó considerando un sistema de instrumentación que ya fue validado y se encontraba en estado operativo, lo cual era indispensable para atender de forma inmediata las necesidades de monitoreo y considerando el inicio de la obra de ampliación y, en particular, la colocación del drenaje bajo el arco central. En esta etapa se colocaron 12 acelerómetros piezoeléctricos y capacitivos de alta sensibilidad, para medir vibraciones en los puntos críticos de la estructura de los arcos.

La configuración de conexión para la adquisición de señales constó de un multiplexor (National Instruments modelo BNC-2090), el cual recaba las señales para que la tarjeta de adquisición (National Instruments modelo DAQCard-6062E) las interprete y, por medio de la plataforma desarrollada, se almacenen y procesen (Figura 8).

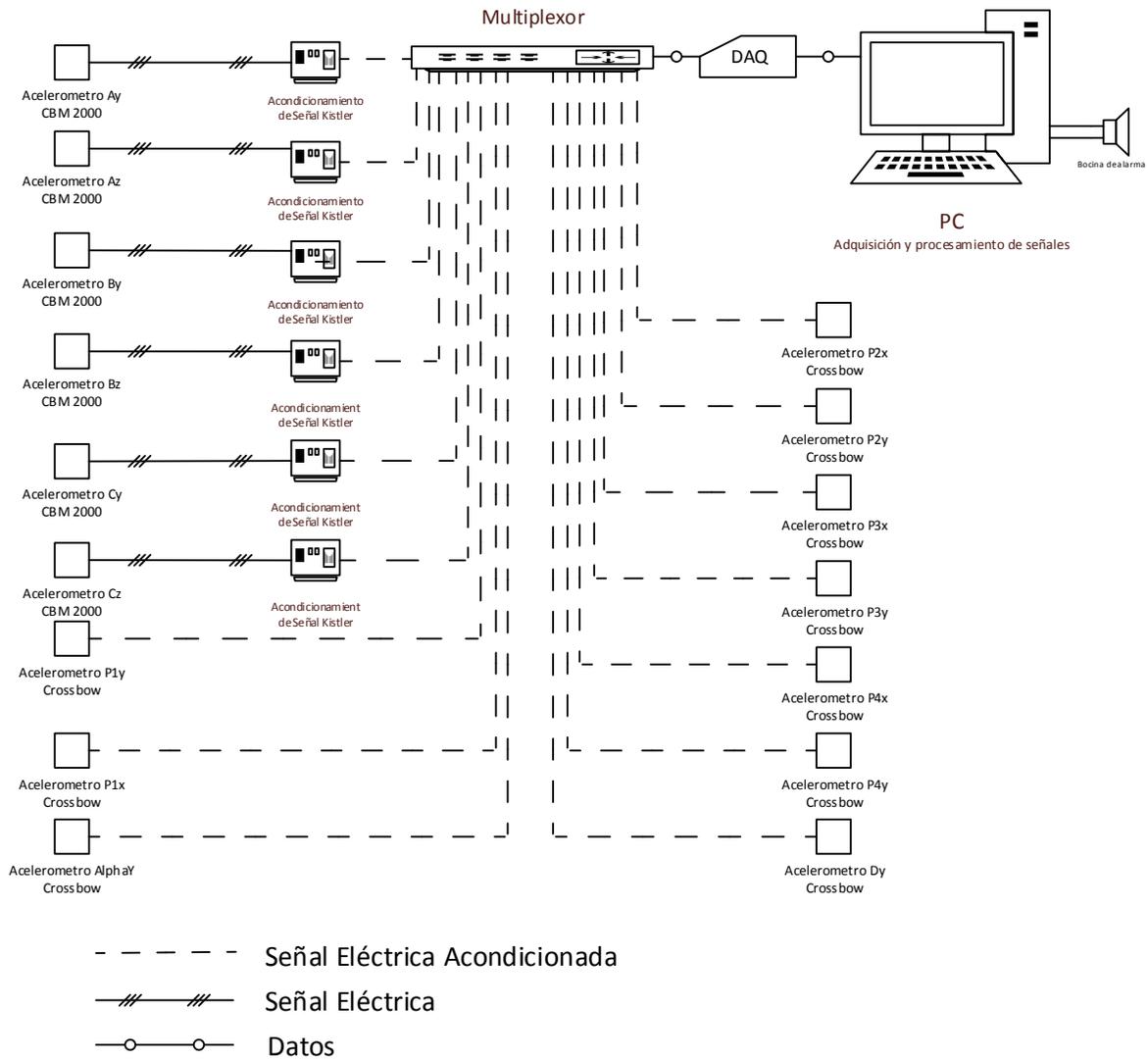


Figura 8. Diagrama de conexión de los sensores empleados en primera etapa de instrumentación

Los sensores piezoeléctricos empleados en esta etapa son de la marca Vibrametrics, modelo CBM 2000 (9) están diseñados para ser usados en estructuras al aire libre. Este acelerómetro cuenta con una alta sensibilidad de 1500 mV/g midiendo la aceleración en un solo sentido dentro de un rango de $\pm 3g$.



Figura 9. Acelerómetro piezoeléctrico CBM 2000

El acondicionador de señal Kistler 5118B2 (Figura 10. Acondicionador de señal Kistler 5118B2) proporciona la corriente de excitación constante requerida por los sensores Vibrametrics CBM 2000. La alimentación del sensor es suministrado por el mismo cable de dos hilos que proporciona la señal de salida de baja impedancia.



Figura 10. Acondicionador de señal Kistler 5118B2

El otro conjunto de acelerómetros son capacitivos de la marca Crossbow, modelo CXL01LF1 (Figura 11), de un solo eje de precisión. Las aplicaciones comunes incluyen instrumentación, análisis modal y las medidas de orientación. El acelerómetro opera a 5 VDC o 6-30 VDC de alimentación no regulada con la opción-R. El sensor proporciona una salida de señal directa la cual no requiere acondicionamiento de señal externo y es sencilla su conexión a los sistemas de adquisición de datos estándar midiendo en un rango de $\pm 1g$ con una sensibilidad de 2 V/g.



Figura 11. Acelerómetro capacitivo Crossbow CXL01LF14

La segunda etapa se consideró para complementar la instrumentación y poder cumplir con el tercer objetivo de monitoreo a través de indicadores de la condición estructural de los arcos que permitan evaluar el comportamiento estructural del monumento con el tiempo e identificar algún tipo de efecto no deseado. Para esto, se consideró una plataforma basada en sensores de fibra óptica tipo FBG, que incluye 16 acelerómetros, 15 extensómetros y 8 inclinómetros.

Al igual que el sistema de adquisición de la primera etapa, se instaló dentro de la cabina de monitoreo el interrogador y multiplexor, teniendo las conexiones de los ocho canales según el diagrama de instrumentación (Figura 12).

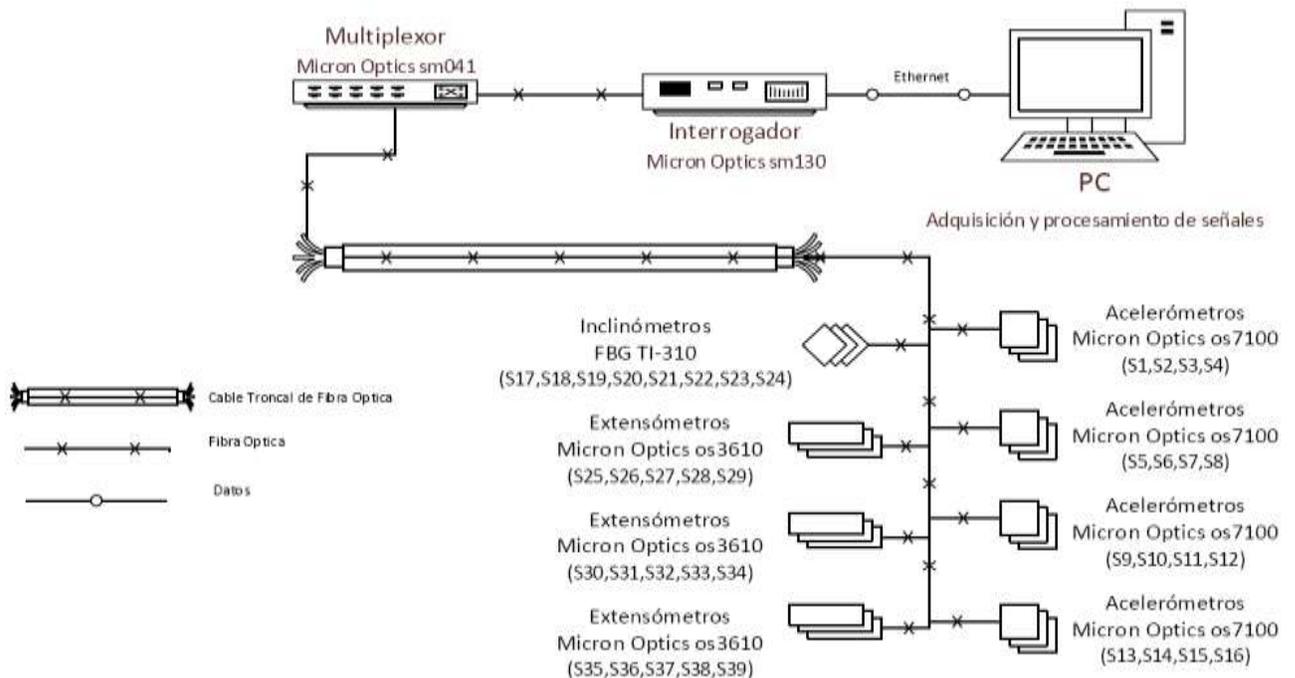


Figura 12. Diagrama de conexión de los sensores empleados en segunda etapa de instrumentación

Los acelerómetros de fibra óptica instalados (Figura 13. Acelerómetro os7100 Micron Optics) son acelerómetros basados en la tecnología FBG de la marca Micron Optics. Están optimizados para grandes estructuras y mediciones a largo plazo, con cuerpo metálico resistente, sellado y cables blindados son ideales para instalaciones al aire libre en estructuras expuestas. Son sensores con una sensibilidad de $\sim 16\text{pm/g}$ trabajando en un rango de temperatura de -40 a 80 °C.



Figura 13. Acelerómetro os7100 Micron Optics

Los extensómetros instalados (

Figura 14. Extensómetro os3610 Micron **Optics**) permiten la medición de deformación longitudinal que a su vez tiene una integración de compensación por temperatura. Están basados en la tecnología de rejilla de Bragg (FBG). El uso de este sensor es exclusivamente para un montaje superficial, ya que en sus extremos está unido a la estructura por medio de soportes rígidos que se pueden soldar, atornillar o pegar con material epóxico. Su configuración de diseño lo hace adecuado para exteriores y entornos hostiles. Dos FBGs están bien protegidos dentro del cuerpo; uno mide la deformación y el otro proporciona la compensación de temperatura. Estos sensores cuentan con una sensibilidad de $\sim 1.2\text{pm}/\mu\epsilon$ y $22\text{pm}/^\circ\text{C}$, trabajando en un rango de temperatura de -40 a 80 °C teniendo como límite $5000 \mu\epsilon$.



Figura 14. Extensómetro os3610 Micron Optics

Por otro lado, los inclinómetros empleados en la instrumentación (Figura 15. FBG-TI-310) son sensores de inclinación que puede medir la variación del ángulo de una estructura con una precisión muy alta, cuentan con una compensación de temperatura integrada. La medición de la variación del ángulo es sólo alrededor

de un eje. El rango de operación es de ± 3 grados teniendo una sensibilidad ~ 450 pm/grado trabajando en un rango de temperatura de -20 a 80°C .



Figura 15. FBG-TI-310 Inclinómetro

Por último, el sistema de adquisición consistió en un interrogador de detección óptica (

Figura 16. Interrogador sm130 **Micron Optics**), el cual tiene un alto poder y velocidad de barrido de longitud de onda del láser. El núcleo interrogador emplea detección de picos hardware de alta velocidad, optimizado para la adquisición rápida de datos de muchos sensores FBG simultáneamente. Todos los ajustes del módulo, los cálculos del sensor, visualización de datos, almacenamiento y tareas se ejecutan en un PC externo. El interrogador cuenta con 4 canales ópticos con una frecuencia de escaneo de 1KHz trabajando dentro de un rango de longitud de onda de 1510 a 1590 nm.



Figura 16. Interrogador sm130 Micron Optics

Para la conexión de más de 4 canales ópticos se requirió utilizar un multiplexor óptico (sm041 de Micron Optics). Éste permite conectar hasta 16 canales ópticos, particularmente el modelo sm041 (

Figura 17. Multiplexor sm041 Micron **Optics**) sólo es compatible con el interrogador sm130.



Figura 17. Multiplexor sm041 Micron Optics

3 Instrumentación del acueducto

Como se mencionó, la primera etapa de instrumentación consistió en un sistema de instrumentación principal, para medir el nivel de vibraciones en los puntos críticos de la estructura de los arcos de Querétaro y así advertir, mediante alarmas, la ocurrencia de condiciones de riesgo por niveles excesivos de vibraciones inducidas por la obra de construcción, desde su inicio hasta su conclusión.

En esta etapa, se colocaron 12 acelerómetros; 6 piezoeléctricos y 6 capacitivos de alta sensibilidad, para medir vibraciones en los puntos críticos de la estructura de los arcos.

La nomenclatura elegida para los acelerómetros capacitivos (Crossbow), colocados sobre las pilas, está compuesta por tres caracteres, los dos primeros indican el número de la pila del acueducto donde se encontraba colocado el sensor en cuestión y el último carácter muestra la dirección del eje de medición del mismo.

Por otra parte la nomenclatura de los acelerómetros piezoeléctricos (Vibra Metrics) está compuesta por dos caracteres, el primero una letra mayúscula A, B y C y el siguiente carácter una letra minúscula que indica la dirección del eje en la que el sensor mide.

En la siguiente tabla se muestra la identificación de los sensores instalados en esta etapa, su posición física en el acueducto y el canal en el que fueron configurados.

Canal	Nomenclatura	Marca	Modelo	Ubicación
Canal 0	Ay	Vibra Metrics	CBM2000	Sobre Arco 26-27
Canal 1	Az	Vibra Metrics	CBM2000	Sobre Arco 26-27
Canal 2	By	Vibra Metrics	CBM2000	Sobre Arco 27-28
Canal 3	Bz	Vibra Metrics	CBM2000	Sobre Arco 27-28
Canal 4	Cy	Vibra Metrics	CBM2000	Sobre Arco 28-29
Canal 5	Cz	Vibra Metrics	CBM2000	Sobre Arco 28-29
Canal 6	P1y	Crossbow	CXL01LF1	En Pila 26
Canal 7	P2x	Crossbow	CXL01LF1	En Pila 27
Canal 8	P2y	Crossbow	CXL01LF1	En Pila 27
Canal 9	P3x	Crossbow	CXL01LF1	En Pila 28
Canal 10	P3y	Crossbow	CXL01LF1	En Pila 28
Canal 11	P4y	Crossbow	CXL01LF1	En Pila 29
Canal 12	Dy	Crossbow	CXL02LF1	Sobre Arco 29-30
Canal 13	P4x	Crossbow	CXL02LF1	En Pila 29
Canal 14	P1x	Crossbow	CXL02LF1	En Pila 26
Canal 15	AlphaY	Crossbow	CXL02LF1	Sobre Arco 25-26

Tabla 1. Nomenclatura de los sensores

Para la comunicación de los sensores con el módulo de adquisición de datos (DAQ) se requirió armar arneses. Seis de los arneses corresponden a cada uno de los cables para los acelerómetros marca VibraMetrics, estos arneses se fabricaron utilizando cable RG 58 a/u. En el caso de los arneses para los sensores marca Crossbow se decidió utilizar cable de 6 hilos.

La colocación final de los sensores piezoeléctricos en los arcos puede verse en la Figura 18 y Figura 19. Los cables fueron protegidos con manguera y el sensor fue fijado con tornillos a una base metálica que a su vez está pegada con material epóxico al monumento; quedando en pares y midiendo en el eje Y y Z según el plano de instrumentación.



Figura 18. Acelerómetros CBM arco 26-27



Figura 19. Acelerómetros CBM arco 27-28

Los sensores se colocaron según la Figura 9 sobre las pilas de los arcos colocados según el eje de medición deseado fijados a una base con material epóxico. En las figuras 20 al 23 se muestra la colocación de estos sensores en el monumento.

Todo el equipo de adquisición de señales se montó dentro de una cabina móvil para tener la adquisición continua las 24 horas y además proteger el equipo. En la Figura 24 se muestra el equipo instalado y funcionando, teniendo una PC conectada al multiplexor que en el cual se conectan todos los arneses de los sensores para registrar su señal.



Figura 20. Acelerómetros Crossbow en pila 26



Figura 21. Acelerómetros Crossbow en pila 27



Figura 22. Acelerómetros Crossbow en pila 28



Figura 23. Acelerómetros Crossbow en pila 29

Por otro lado, se realizó la instalación del sistema de monitoreo complementario, con el cual se evaluó la evolución de variables asociadas con los parámetros estructurales de los arcos (frecuencias de vibración, inclinación y deformaciones), para ello se instalaron 16 acelerómetros de fibra óptica, 8 inclinómetros y 15 extensómetros de fibra.



Figura 24. Equipo de adquisición instalado en la cabina de monitoreo

La instalación de los sensores en el monumento de los arcos requirió que se fabricaron bases metálicas para cada sensor y fijarlas con resina epóxica. Al igual que los sensores de la primera etapa se instalaron de manera estratégica en puntos clave del monumento como se muestra en el diagrama de instrumentación (Figura 7).

La identificación de los sensores de la segunda etapa quedo de la siguiente manera:

Tabla 2. Acelerómetros instalados

Tipo	Nomenclatura	Marca	Modelo	Ubicación
Acelerómetro	S1	Micron Optics	Os7100	Arco 29-30
Acelerómetro	S2	Micron Optics	Os7100	Pila 28
Acelerómetro	S3	Micron Optics	Os7100	Pila 28
Acelerómetro	S4	Micron Optics	Os7100	Pila 28
Acelerómetro	S5	Micron Optics	Os7100	Pila 29
Acelerómetro	S6	Micron Optics	Os7100	Pila 29
Acelerómetro	S7	Micron Optics	Os7100	Pila 29
Acelerómetro	S8	Micron Optics	Os7100	Pila 29
Acelerómetro	S9	Micron Optics	Os7100	Arco 25-26
Acelerómetro	S10	Micron Optics	Os7100	Pila 27
Acelerómetro	S11	Micron Optics	Os7100	Pila 27
Acelerómetro	S12	Micron Optics	Os7100	Pila 27
Acelerómetro	S13	Micron Optics	Os7100	Pila 26
Acelerómetro	S14	Micron Optics	Os7100	Pila 26
Acelerómetro	S15	Micron Optics	Os7100	Pila 26
Acelerómetro	S16	Micron Optics	Os7100	Pila 26

Tabla 3. Inclinómetros instalados

Tipo	Nomenclatura	Marca	Modelo	Ubicación
Inclinómetro	S17	FBG	FBG-TI-310	Pila 29
Inclinómetro	S18	FBG	FBG-TI-310	Pila 29
Inclinómetro	S19	FBG	FBG-TI-310	Pila 28
Inclinómetro	S20	FBG	FBG-TI-310	Pila 28
Inclinómetro	S21	FBG	FBG-TI-310	Pila 27
Inclinómetro	S22	FBG	FBG-TI-310	Pila 27
Inclinómetro	S23	FBG	FBG-TI-310	Pila 26
Inclinómetro	S24	FBG	FBG-TI-310	Pila 26

Tabla 4. Extensómetros instalados

Tipo	Nomenclatura	Marca	Modelo	Ubicación
Extensómetro	S25	Micron Optics	Os3610	Arco 29-30
Extensómetro	S26	Micron Optics	Os3610	Arco 28-29
Extensómetro	S27	Micron Optics	Os3610	Arco 28-29
Extensómetro	S28	Micron Optics	Os3610	Arco 28-29
Extensómetro	S29	Micron Optics	Os3610	Arco 28-29
Extensómetro	S30	Micron Optics	Os3610	Canal del arco 27-28
Extensómetro	S31	Micron Optics	Os3610	Arco 27-28
Extensómetro	S32	Micron Optics	Os3610	Arco 27-28
Extensómetro	S33	Micron Optics	Os3610	Arco 27-28
Extensómetro	S34	Micron Optics	Os3610	Arco 27-28
Extensómetro	S35	Micron Optics	Os3610	Arco 25-26
Extensómetro	S36	Micron Optics	Os3610	Arco 26-27
Extensómetro	S37	Micron Optics	Os3610	Arco 26-27
Extensómetro	S38	Micron Optics	Os3610	Arco 26-27
Extensómetro	S39	Micron Optics	Os3610	Arco 26-27

Para la conexión de los sensores al equipo de adquisición de datos se colocó un cable troncal de 12 fibras a lo largo canal del acueducto desde la pila 26 hasta la cabina de monitoreo. Como se muestra en el diagrama de instrumentación (Figura 7), se requirió dividir los sensores en diferentes canales que estos se conectaban

al cable troncal en cajas de empalme como la de la Figura 27 y Figura 28 todos los sensores.

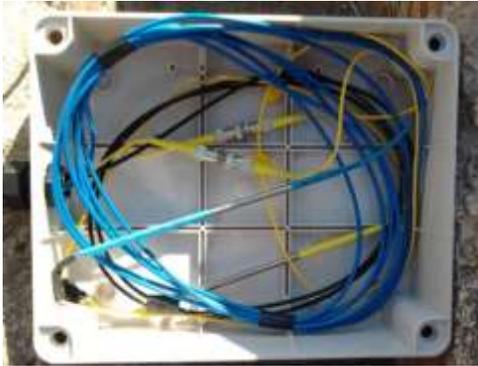


Figura 25. Caja de empalme (interior)



Figura 26. Cajas de empalme sobre el canal

Los acelerómetros de fibra óptica se instalaron en arreglos uniaxiales y triaxiales (Figura 27), ambos arreglos utilizando la misma base y fueron fijados con material epóxico al acueducto. Todo el tendido de los cables de fibra óptica requirió la instalación de armellas como soporte además de protegerse con manguera con el objeto de reducir el desgaste a la intemperie.



a) Acelerómetro en arco 29-30, arreglo uniaxial



b) Acelerómetro en arco 25-26, arreglo uniaxial



c) Acelerómetros en pila 29, arreglo triaxial



d) Acelerómetros en pila 28, arreglo triaxial



e) Acelerómetros en pila 27, arreglo triaxial



f) Acelerómetros en pila 26, arreglo triaxial

Figura 27. Acelerómetros instalados en el acueducto

Los extensómetros de fibra óptica fueron colocados de acuerdo al plano de instrumentación a los centros de claro y a un cuarto del claro total de los arcos del acueducto (Figura 28), esto con el fin de medir las deformaciones unitarias en estos puntos y visualizar así la distribución de deformaciones en los arcos intervenidos.



a) Extensómetro en arco 25-26



b) Extensómetro en arco 26-27



c) Extensómetro en arco 26-27



d) Extensómetro en arco 26-27



e) Extensómetro en arco 27-28



f) Extensómetro en arco 27-28



g) Extensómetro en arco 27-28



h) Extensómetro en arco 28-29



i) Extensómetro en arco 28-29



j) Extensómetro en arco 28-29



k) Extensómetro en arco 29-30



l) Extensómetro en canal del arco 27-28

Figura 28. Extensómetros instalados en el acueducto

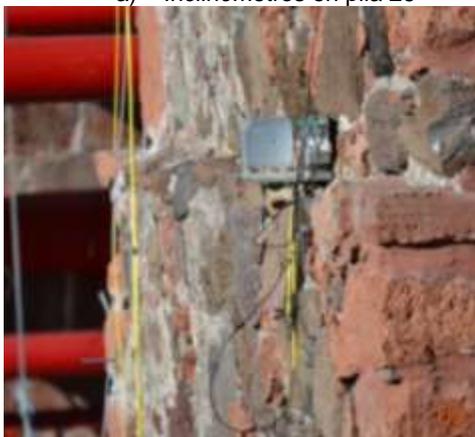
Los inclinómetros (Figura 29) se colocaron en pares en las cuatro pilas de los arcos del acueducto que fueron intervenidos, su colocación hace posible medir la rotación alrededor de los ejes X y Y, según la referencia del plano de instrumentación. Al igual que los demás sensores se fabricaron bases metálicas para su fijación con resina epóxica al monumento.



a) Inclinómetros en pila 26



b) Inclinómetros en pila 27



c) Inclinómetros en pila 28



d) Inclinómetros en pila 29

Figura 29. Inclinómetros instalados en el acueducto

Al igual que el sistema de adquisición de la primera etapa, se instaló dentro de la cabina de monitoreo el interrogador y multiplexor (Figura 30), teniendo las conexiones de los ocho canales según el diagrama de instrumentación.



Figura 30. Interrogador y multiplexor para fibra óptica instalados en caseta de monitoreo

4 Monitoreo estructural del acueducto

El planteamiento de los esquemas de monitoreo estructural y la planeación de las estrategias de actuación en caso de algún comportamiento atípico de la estructura del acueducto fueron diseñadas siguiendo los requerimientos establecidos por el Comité de Monitoreo, el cual fue conformado por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas del Gobierno del Estado de Querétaro.

El apéndice A, (Criterios de indicadores de monitoreo para la seguridad estructural de acueducto durante el proceso constructivo del gran paso acueducto), hace referencia a los criterios establecidos por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas del Gobierno del Estado de Querétaro.

Siguiendo los criterios establecidos y considerando que las obras se realizaban durante las 24 horas del día, el monitoreo estructural planteado fue continuo, en tiempo real y de respuesta inmediata. Para ello, se diseñó una plataforma que permitiera monitorear las señales de cada uno de los sensores instalados y analizarlas para brindar mayor información acerca de los fenómenos registrados durante la obra civil.

La plataforma desarrollada debió cumplir con los siguientes objetivos:

- Adquisición de señales
- Registro de las señales
- Post-procesamiento de señales
- Alarmas de seguridad estructural
- Generación de reportes automáticos
- Brindar enlace de datos para página Web
- Monitoreo a distancia

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo a las etapas de instrumentación se emplearon dos tipos de tecnología. Para la primera etapa se utilizaron acelerómetros piezoeléctricos y capacitivos con una alta sensibilidad para la detección inmediata de aceleraciones que pudieran sobrepasar los valores máximos establecidos. La adquisición de las señales de esta primera etapa se hizo a través de una tarjeta de adquisición de datos NI PCI-6071E, siendo

LabView el software de interpretación y la plataforma desde la cual se generaron las aplicaciones.

En la figura 34, se muestra la interfaz desarrollada para la adquisición y visualización de las señales de estos sensores, las señales fueron agrupadas en dos ventanas, en una de ellas, se muestran los sensores instalados en los centros de claros de los arcos (piezoeléctricos) y en otra, aquellos ubicados en la parte superior de las pilas (capacitivos), dejando otras dos ventanas adicionales para la elección personalizada de los sensores de interés.

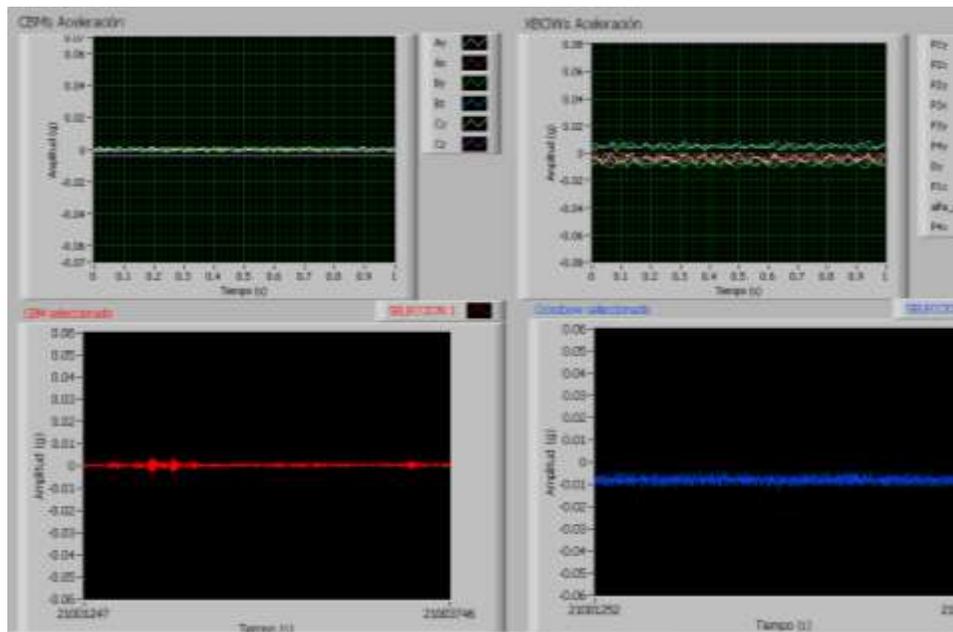


Figura 31. Adquisición de las señales

Debido a la gran cantidad de información almacenada, se planteó guardar la información en archivos que contuvieran cinco minutos de adquisición para analizarlos con facilidad. Con estos registros, adicionalmente a las ventanas de visualización de las señales se programaron gráficos para visualizar el historial del día (24 horas) y visualizar fácilmente las horas del día en las que se presentaron registros máximos, la Figura 35 muestra esta opción dentro de la interfaz diseñada.

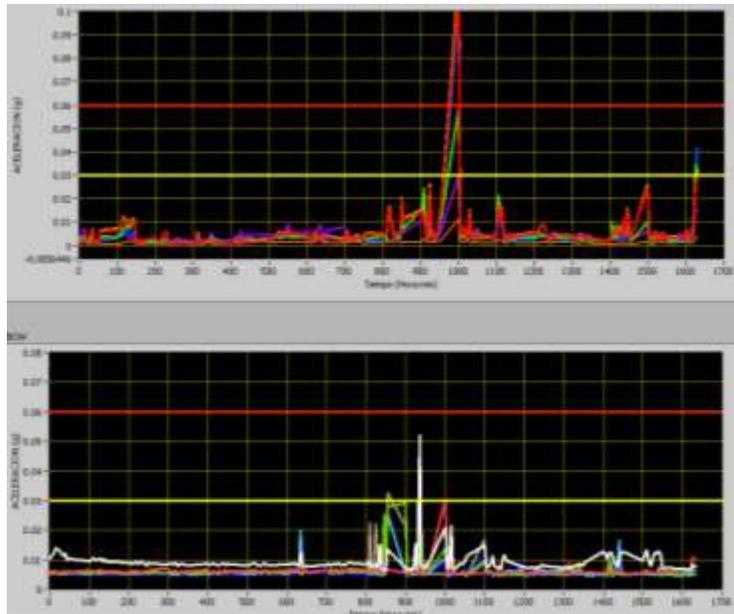


Figura 32. Registros máximos diarios

Para el cumplimiento de los protocolos de actuación establecidos por el comité, se estableció en la interfaz desarrollada un semáforo que simboliza los estados señalados en los criterios, el cual se activa de manera gráfica y sonora alertando la ocurrencia de un evento extraordinario que sobrepase los valores máximos realizando un escaneo automático y continuo sobre los registros de las señales.

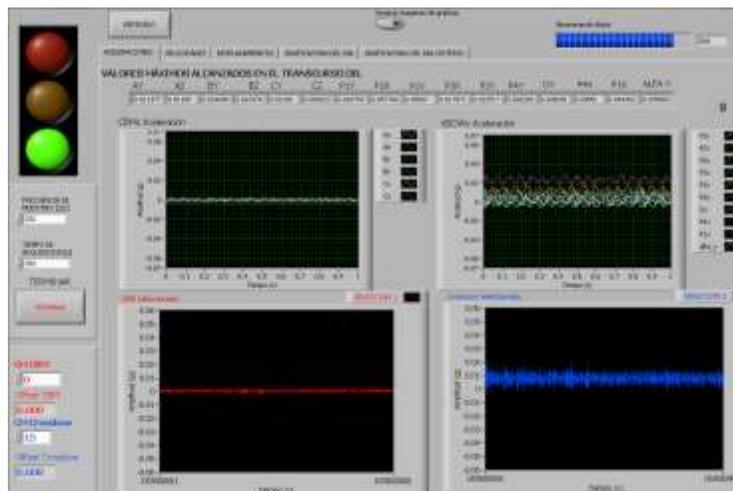


Figura 33. Semáforo de alarmas de seguridad estructural

Adicional al aviso emitido a las autoridades en los momentos en los que se alcanzaron valores extraordinarios, se emitieron reportes escritos de los eventos registrados, además de proporcionar un reporte por día en el que se incluían los tres eventos de mayor relevancia en el último periodo de 24 horas, para ello fue

necesario generar rutinas de post-proceso de los datos en una aplicación, la cual genera un concentrado de toda la información necesaria para la generación de los reportes, como magnitudes de aceleración registradas y espectros de frecuencias (Figura 34).



Figura 34. Interfaz de aplicación para la generación de reportes automáticos

En el apéndice A se muestran algunos reportes de eventos representativos correspondientes a este conjunto de sensores.

Por otra parte, para el conjunto de sensores de fibra óptica, con el fin de atender las peticiones de la SDUOP, se elaboraron diariamente reportes de los registros de las señales. Específicamente, para los reportes de fibra óptica, se realizó un resumen de 3 días consecutivos por reporte diario, esto con el fin de mostrar el seguimiento de deformaciones e inclinaciones en el monumento y evidenciar ciertos efectos como el de la temperatura en los registros (Figura 35).

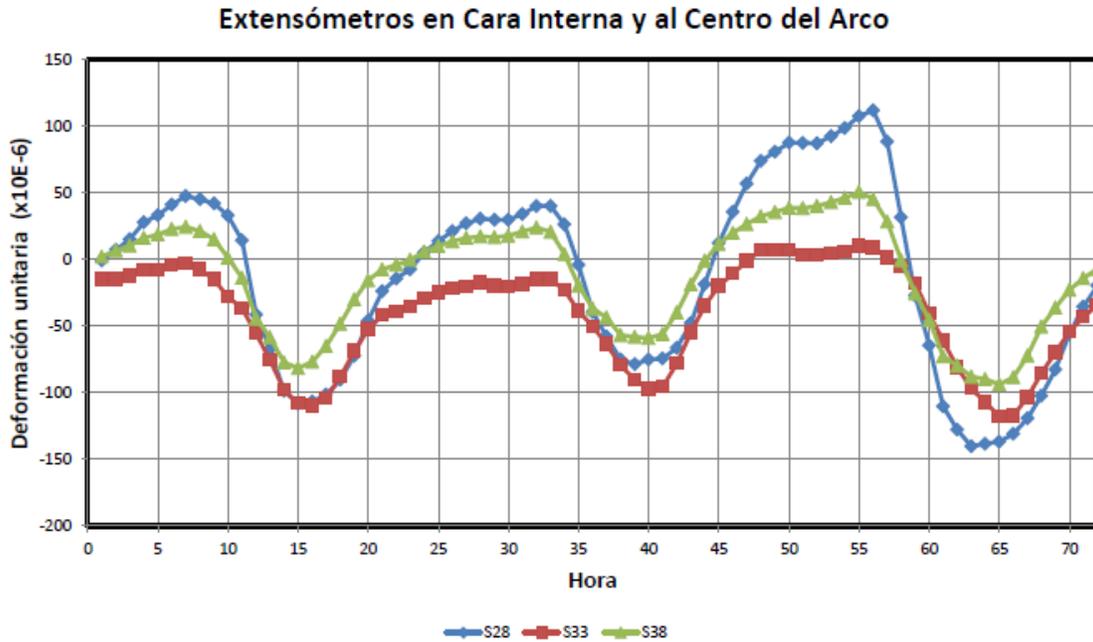


Figura 35. Deformaciones unitarias en extensómetros al centro de arco durante 72 horas

Debido a lo iterativo de los procesos para la generación de los reportes, se decidió automatizarlo, utilizando como plataforma principal LabVIEW y vinculándolo a Excel. En la Figura 36 se muestra un diagrama de flujo con este proceso.



Figura 36. Diagrama de flujo y operación de datos para la generación de los reportes

Esta aplicación permite leer la información almacenada en una PC. La caratula de la aplicación se muestra en la figura 37.

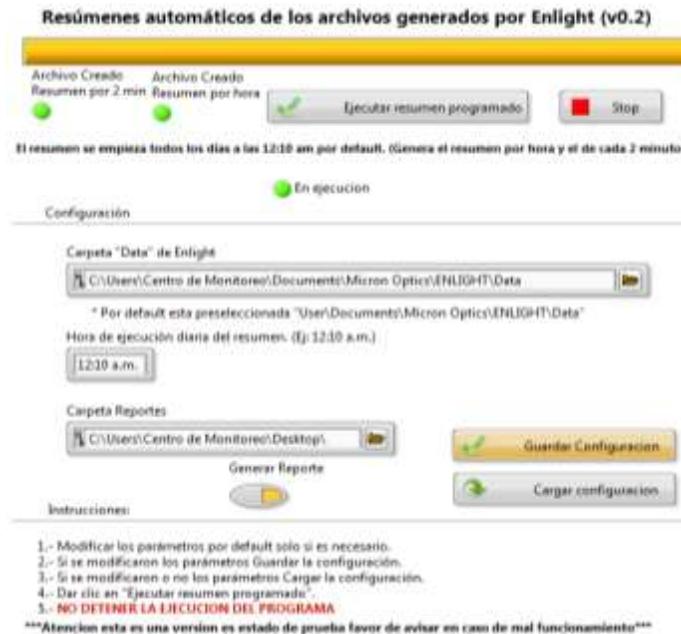


Figura 37. Aplicación de reportes automáticos

El funcionamiento primordial de esta aplicación, es el de un despertador que diariamente, a una hora específica, genera un resumen diario de todas las señales registradas de los sensores. Este resumen se genera a partir de los datos adquiridos con Enlight, de los archivos de 2 minutos se hace un resumen del promedio de todos los valores, después, conjuntando una hora de esos resúmenes se vuelve a promediar por horas, para tener un valor típico de esa hora. Posteriormente rellena la plantilla de Excel y genera el PDF ejecutando macros desde LabVIEW y guardándolos en algún directorio deseado.

En esta etapa de instrumentación de fibra óptica también se requirió de un enlace de información de los sensores para una página Web también desarrollada por el equipo de trabajo. Este enlace consistió en el envío continuo de gráficos al administrador Web para su publicación en Internet, por lo que se requirió desarrollar una aplicación que lo haga. Esta aplicación utiliza los resúmenes generados de dos días anteriores y haciendo un resumen cada hora de los datos registrados en el día de ejecución generando un historial de los datos que abarcan 48 a 72 horas de los últimos tres días. Teniendo estos resúmenes se grafican y se exportan al administrador Web. Estas graficas se guardan en el directorio fuente

de la página Web que se encuentra en un servidor sobre la misma red de datos (Figura 38).

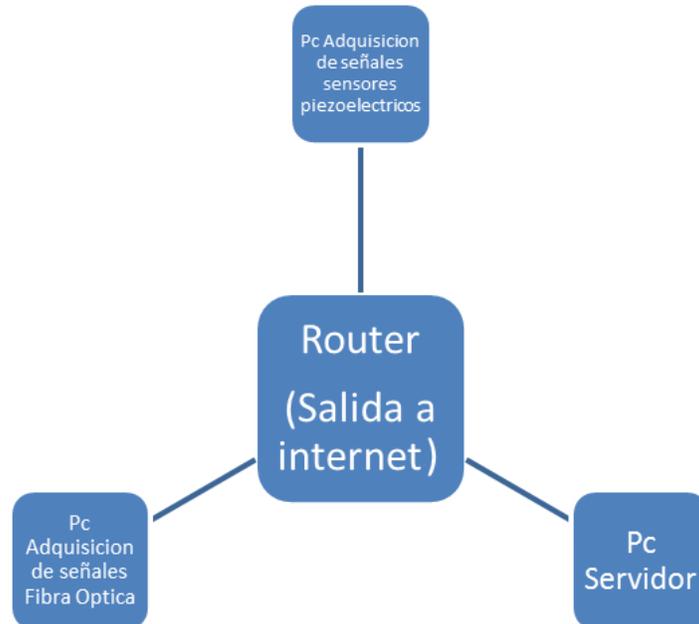


Figura 38. Red de datos en sitio de monitoreo

El desarrollo del portal (Figura 39) fue desarrollado en HTML 5, PHP 5 y CSS 3, cuyos códigos fueron programados en Notepad++. El servidor usa el paquete xampp, el cual brinda el Servidor Web Apache, el manejador de Base de Datos MySql y una versión del lenguaje PHP a partir de la 5.



Figura 39. Entrada a Página Web desarrollada

Para poder brindar la mayor escalabilidad y mantenimiento, se utiliza el paradigma de programación Web que se usa para el contenido de la presentación. Esto es, los archivos HTML contienen la información o los vínculos a la misma, y los archivos CSS o de hojas de estilo en cascada, contienen los aspectos de presentación, es decir, colores, formato, efectos, tipografía, dimensión.



Figura 40. Página principal

La estructura del sitio se compone básicamente del cuerpo de la página, el encabezado con el nombre del proyecto, la opción de salir, el pie y un menú horizontal que contiene todas las secciones del portal Figura 40.

Buscando el mayor apego posible al nuevo estándar de HTML 5, cada página del sitio se divide en los elementos básicos de la estructura y posterior maquetación: DOCTYPE, idioma del sitio, header, section, nav, footer.

En la página Web, se brindó información a los usuarios del tipo de equipo que se empleó para el monitoreo, especificaciones de estos (Figura 41), una galería fotográfica de los mismos y su instalación y un historial completo de todos los reportes generados diariamente en la cabina de monitoreo.

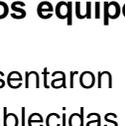
Monitoreo Estructural los Arcos							Salir
Inicio	Introducción	Reportes	Monitoreo	Fibra Óptica	Equipos	Galería	Calibración
Tipo	Marca	Modelo	Identificación	S.D.U.O.P.	Observaciones	Sensor	
Acelerómetro	Vibrantec	CBM 2000	C0	Arco 26-27 Y	Piezoelectrico		
Acelerómetro	Vibrantec	CBM 2000	C1	Arco 26-27 Z	Piezoelectrico		
Acelerómetro	Vibrantec	CBM 2000	C2	Arco 27-28 Y	Piezoelectrico		
Acelerómetro	Vibrantec	CBM 2000	C3	Arco 27-28 Z	Piezoelectrico		
Acelerómetro	Vibrantec	CBM 2000	C4	Arco 28-29 Y	Piezoelectrico		
Acelerómetro	Vibrantec	CBM 2000	C5	Arco 28-29 Z	Piezoelectrico		
Acelerómetro	Crossbow	CXL011F1	C6	Pila 26 Y	Capacitivo		
Acelerómetro	Crossbow	CXL011F1	C7	Pila 27 X	Capacitivo		
Acelerómetro	Crossbow	CXL011F1	C8	Pila 27 Y	Capacitivo		
Acelerómetro	Crossbow	CXL011F1	C9	Pila 28 X	Capacitivo		
Acelerómetro	Crossbow	CXL011F1	C10	Pila 28 Y	Capacitivo		
Acelerómetro	Crossbow	CXL011F1	C11	Pila 29 Y	Capacitivo		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S1	Arco 29-30 Y	Fibra Óptica		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S2	Pila 28 X	Fibra Óptica		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S3	Pila 28 Y	Fibra Óptica		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S4	Pila 28 Z	Fibra Óptica		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S5	Pila 29 X	Fibra Óptica		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S6	Pila 29 X	Fibra Óptica		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S7	Pila 29 Y	Fibra Óptica		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S8	Pila 29 Z	Fibra Óptica		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S9	Arco 25-26 Y	Fibra Óptica		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S10	Pila 27 X	Fibra Óptica		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S11	Pila 27 Y	Fibra Óptica		
Acelerómetro	Micron Optics	os7100	S12	Pila 27 Z	Fibra Óptica		

Figura 41. Página con la información de los equipos

Durante el monitoreo estructural del acueducto se presentaron eventos en los cuales las respuestas registradas sobrepasaron las establecidas como máximas en los criterios marcados por el comité. Entre estos eventos se encuentran las excavaciones para la colocación del ducto (Figura 42) durante el mes de

septiembre, la perforación para micropilotes en las zonas perimetrales a las pilas del acueducto (Figura 43) y las renivelaciones de los cabezales (Figura 44).



Figura 42. Excavación de zanja para colocación de ducto de concreto en arco central



Figura 43. Perforación en perímetro de pilas para el colado de micropilotes de concreto reforzado colado in situ



Figura 44. Colado de micropilotes de concreto reforzado

5 Resultados

Durante el monitoreo estructural continuo de los arcos del acueducto de Querétaro operado del 20 de agosto de 2012 al 15 de febrero de 2013 se presentaron eventos en los cuales las respuestas registradas sobrepasaron las establecidas como máximas en los criterios marcados por el Comité de Monitoreo. Entre estos eventos se encontraron las excavaciones para la colocación del ducto (Figura 45.a) durante el mes de septiembre, la perforación para micropilotes en las zonas perimetrales a las pilas del acueducto (Figura 45.b) y las renivelaciones de los cabezales (Figura 45.c).



(a)

(b)

(c)

Figura 45. (a) Excavación en arco central, (b) Perforación en pilas, (c) Renivelación

En la Tabla 5, se presenta un resumen de los casos más críticos con niveles de aceleración máxima, ocurridos durante la obra y que fueron registrados por el sistema de monitoreo. Como puede verse, varios de estos eventos sobrepasaron los límites establecidos, por lo que fue necesario detener las actividades para revisar los procesos y replantear las acciones a seguir (Figura 46).

Tabla 5. Aceleraciones registradas en eventos registrados durante la obra

Fecha	Clave	Actividad	Magnitud (g)
26-ago	A1	DEMOLICIÓN DE PAVIMENTO	0.063
28-ago	A2	EXCAVACIÓN PARA DREN PLUVIAL	0.062
11-sep	A3	PERFORACIÓN PARA PILAS	0.120
17-oct	A4	DESCABEZADO DE PILAS	0.130
18-oct	A5	COMPACTADO CON RODILLO CARRIL CENTRAL	0.100
22-oct	A6	GOLPE DE PLACA SOBRE LOZA DEL PUENTE	0.070
26-oct	A7	CORTE CON HILO DIAMANTADO	0.045
02-nov	A8	PERFILADO DE PILAS Y DEMOLICIONES	0.095
30-dic	A9	DESMONTAJES Y MANIOBRAS CON GRÚA	0.069
14-ene	A10	VIBRO COMPACTACIÓN DE CARPETA ASFÁLTICA EN PASO INFERIORORIENTE	0.078
22-ene	A11	RETIRO DE CARPERA ASFÁLTICA CON MARTILLO Y EXCAVADORA	0.072

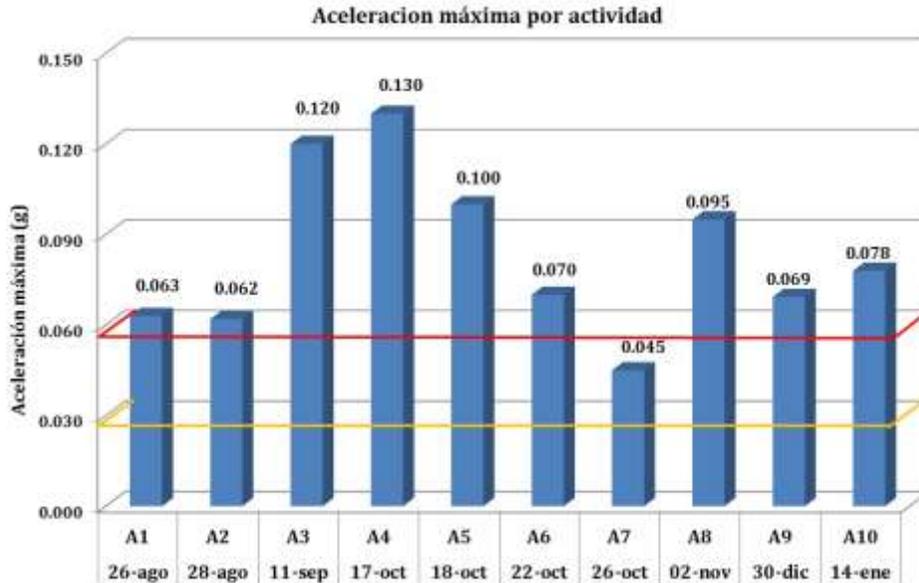


Figura 46. Magnitudes de aceleraciones máximas registradas

De un análisis más detallado de las respuestas dinámicas del acelerómetro ubicado en el centro del arco ubicando entre las pilas 27 y 28, dirección “y”, se

revela una variación en las frecuencias naturales de vibrar en el periodo del 15 de septiembre de 2012 al 16 de enero de 2013, todas ellas de mediciones a las 2 am que corresponde a la hora de menor actividad de tráfico. El cambio observado en la frecuencia natural va de 5.25 Hz a 4.75 Hz aproximadamente (Figura 47), lo que denota una reducción del 5% que puede ser atribuida al cambio en las condiciones de la cimentación de las pilas, las variaciones de temperatura durante el periodo observado o a una posible reducción de rigidez. Para establecer con mayor precisión la causa de esta observación, es necesario realizar más mediciones en dicho punto y medir las variaciones cíclicas que se presentan en el periodo de un año, y así, establecer si esto representa un comportamiento cíclico natural de la estructura o una tendencia de variación constante por causas externas.

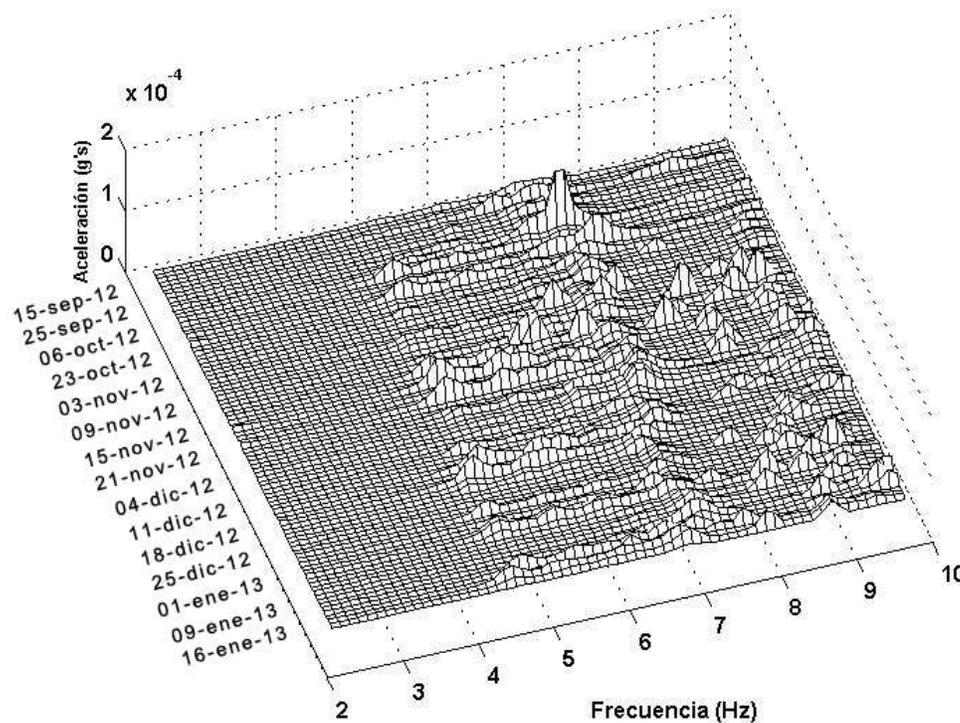


Figura 47. Espectros frecuencia amplitud de datos de acelerómetro en arco central

Por otro lado, a través de los sensores de deformación colocados en los tres arcos intervenidos, fue posible seguir el comportamiento de este parámetro a lo largo de las actividades de la obra considerando únicamente las deformaciones por efecto térmico durante estas actividades (Figura 35). Así, el análisis de este parámetro en las diversas zonas de los tres arcos instrumentados, permiten conocer el

comportamiento de la mampostería que los compone ante el efecto térmico, observándose correspondencias entre las respuestas de las zonas ante los gradientes térmicos diarios (Figura 48), lo que puede definir un comportamiento típico del monumento o “el pulso” de la estructura.

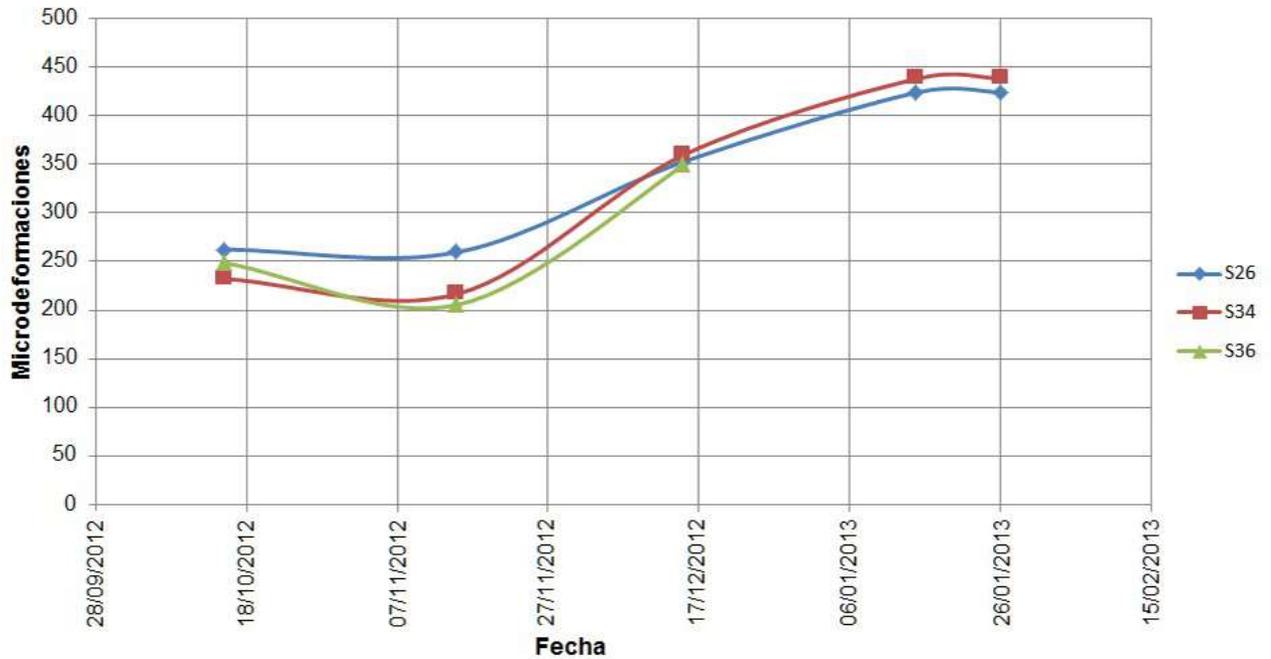


Figura 48. Gradientes de deformación entre sensores de deformación en centro de arcos

6 Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se comprueba que el sistema de monitoreo que se instaló en los arcos del acueducto de Querétaro, cumplió satisfactoriamente con su propósito fundamental, ya que se identificaron eventos críticos que pusieron en riesgo al monumento histórico, permitiendo que se tomaran las precauciones necesarias y se realizaran los cambios en los procesos constructivos para mitigar los efectos potenciales de lo inicialmente detectado.

El sistema desarrollado, por un lado, proporcionó información en tiempo real para actuación inmediata ante condiciones críticas, pero también, registros históricos para evaluar el desempeño estructural del monumento durante las distintas etapas constructivas, al final de la obra misma y para estudios futuros.

El análisis de la información medida es una muestra clara del valor e importancia que pueden tener los sistemas de monitoreo estructural de monumentos históricos para su conservación. Esto es un ejemplo de la aplicación del monitoreo estructural cuyo valor no sólo se da en condiciones especiales, como lo fue la obra del Gran Paso Acueducto, sino también, en el largo plazo, para identificar variaciones o deterioro graduales para que puedan ser atendidos a tiempo y lograr su preservación para futuras generaciones.

7 Bibliografía

- Cimellaro G.P., 2013, *Preliminary analysis of ambient vibration tests of an ancient renaissance palace after 2012 emilia earthquake in northern Italy*, The 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Hong Kong, 9-11 December 2013.
- Glisic B., Inaudi D., 2007, *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*, Ed. John Wiley & Sons.
- Grosse C., 2010, *Smart Monitoring of Historic Structures by Wireless Sensors*, Conservation of heritage structures, Proceedings of CSHM-3, Ottawa-Gatineau, Canada, 11-13 August 2010.
- Lubej S., 2010, *Construction Vibrating and its impact on heritage structures*, Conservation of heritage structures, Proceedings of CSHM-3, Ottawa-Gatineau, Canada 11-13 August 2010.
- Manos G.C, 2010, *A numerical Investigation of the Dynamic and Earthquake Behavior of Byzantine and Post-Byzantine Basilicas*, Conservation of heritage structures, Proceedings of CSHM-3, Ottawa-Gatineau, Canada 11-13 August 2010.
- Monti G., 2010, *Structural Health Monitoring of the COLOSSEUM: Optimal sensors placement*, Conservation of heritage structures, Proceedings of CSHM-3, Ottawa-Gatineau, Canada, 11-13 August 2010.
- Piot S., 2010, *Novative Solutions for Heritage Structures Monitoring*, Conservation of heritage structures, Proceedings of CSHM-3, Ottawa-Gatineau, Canada, 11-13 August 2010.
- Quintana Rodríguez, J. A., 2010, *Análisis del efecto de las vibraciones ambientales en los arcos del acueducto de Querétaro*. Informe de investigación, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro.
- Rivera, D., Meli, R., Sánchez, R. and Orozco, B., 2008, *Evaluation of the measured seismic response of the Mexico City Cathedral*. Earthquake Engng. Struct. Dyn., 37: 1249–1268.

Santoyo, E, y Segovia, J. A., 1999. *Recimentación y renivelación de estructuras y monumentos*. TGC Geotecnia, S. A. de C. V., 2ª Edición, México, D. F.

Verstryngge E., 2010, *Monitoring, Assesing and Strengthening Historical Masonry Structures: Case Studies*, Conservation of heritage structures, Proceedings of CSHM-3, Ottawa-Gatineau, Canada, 11-13 August 2010.

Apéndice A. Criterios de indicadores de monitoreo para la seguridad estructural de acueducto durante el proceso constructivo del gran paso acueducto

Toda instalación de instrumentos de medición en estructuras tiene el objetivo de registrar el comportamiento de la construcción, a través de aceleraciones, velocidades, desplazamientos y frecuencias y modos de vibrar, ante acciones dinámicas extremas como lo son sismos, viento, explosión y operación de equipos y maquinaria, mediante historias en el tiempo presentadas en gráficas. Otro de los objetivos de la instrumentación es definir las probables causas de los movimientos que alteran de manera importante el comportamiento estructural.

En este caso, los dos objetivos descritos arriba deben ser incluidos en los reportes de instrumentación ya que el acueducto en estudio es patrimonio universal.

1. REQUERIMIENTOS PREVIOS

Para asegurar que se cumplan los objetivos, la compañía encargada de las mediciones debe entregar, como mínimo, los siguientes reportes, resultados e interpretaciones a los datos obtenidos.

Antes de iniciar los trabajos de medición el proveedor de la instrumentación debe presentar y entregar copia de:

1. Características físicas y dinámicas de los equipos que utilizarán (ficha técnica).
2. Certificado de calibración de los mismos expedido por el fabricante o una empresa legalmente autorizada para ello.
3. Los arreglos de equipo que se utilizarán en cada etapa de la medición, si ésta consta de varios periodos o un plan generalizado de arreglo, con la explicación del motivo de ubicación para cada equipo.
4. Protección a los equipos, cuando se requiera, para evitar contaminación accidental de las señales.

En este caso, es necesario colocar un equipo en cada base y parte superior de las cuatro pilastras que serán afectadas por los anillos confinantes, que puedan medir triaxialmente la respuesta dinámica de cada elemento o equipos equivalentes.

Durante la etapa de trabajos de la obra, para cada evento y para cada dirección de medición, el proveedor deberá entregar en formato gráfico y numérico:

1. Las respuestas máximas encontradas (aceleraciones, velocidades y desplazamientos) en ventanas de tiempo adecuadas, para que la información pueda ser fácilmente interpretada (se sugieren ventanas de 3 min).
2. Las 5 primeras frecuencias características.
3. La causa probable de los picos presentados en la respuesta.

Se entenderá por evento a la perforación para la construcción de una pila, la demolición de muros existentes, el desplazamiento o paso de maquinaria o camiones pesados o cualquier otra causa de movimientos perceptibles en la base que generen picos significativos en la respuesta.

Se deberá proveer, previo consentimiento de la dirección del proyecto, de un sistema de semáforo automatizado de disparo, que active una alarma inmediata en la dirección de la obra y en al menos otra oficina clave, en caso de que el semáforo alcance el protocolo AMARILLO o ROJO en cualquier aparato de medición.

2. PARÁMETROS

2.1 ACELERACIÓN NORMALIZADA CON LA GRAVEDAD

Semáforo	Límite inferior	Límite superior	Observaciones
VERDE		0.030	g
AMARILLO	Mayor a 0.030	0.060	Frecuencia menor o igual a 30 Hz, velocidad máx= 3 mm/seg
ROJO	Mayor a 0.060		Frecuencia mayor de 30 Hz y menor a 60 Hz, velocidad máx=4mm/seg

2.2 DESPLAZAMIENTO. En la parte superior de cada pilastra (mm)

Semáforo	Límite inferior	Límite superior	Observaciones
VERDE		0.025 mm	De la información correspondiente a los instrumentos ubicados en la parte superior de cada pilastra
AMARILLO	Mayor a 0.025 mm	0.0508 mm	De la información correspondiente a los instrumentos ubicados en la parte superior de cada pilastra
ROJO	Mayor a 0.0508 mm		De la información correspondiente a los instrumentos ubicados en la parte superior de cada pilastra

2.3 DESPLAZAMIENTO. En el centro de cada arcada (mm)

Semáforo	Límite inferior	Límite superior	Observaciones
VERDE		0.025 mm	De la información correspondiente a los instrumentos ubicados en la parte superior de cada pilastra
AMARILLO	Mayor a 0.025 mm	0.0508 mm	De la información correspondiente a los instrumentos ubicados en la parte superior de cada pilastra
ROJO	Mayor a 0.0508 mm		De la información correspondiente a los instrumentos ubicados en la parte superior de cada pilastra

3. PROTOCOLOS

Los protocolos se iniciarán cuando se presente cualquiera de los eventos establecidos, ya sea en las pilastras o en el centro de cada arcada.

3.1 SEMÁFORO VERDE

1. Trabajo normal.
2. Monitoreo proporciona información en forma gráfica y numérica programada normalmente diaria referente a:

- a) Desplazamiento
- b) Velocidad
- c) Aceleración
- d) Frecuencia
- e) Croquis de ubicación de sensores

3.2 SEMÁFORO AMARILLO

1. Monitoreo informa en forma inmediata a la Dirección Externa de la Obra del evento presentado.
2. Monitoreo proporciona en forma inmediata la siguiente información tanto gráfica como numéricamente:
 - a) Localización del evento
 - b) Duración del evento
 - c) Desplazamiento
 - d) Velocidad
 - e) Aceleración
 - f) Frecuencia
 - g) Croquis de ubicación de sensores
3. A juicio de la Dirección Externa de Obra se analizará si se continúa con el proceso constructivo o se modifica en alguno de sus frentes de ataque.
4. En caso de que las velocidades sean mayores de las indicadas en la Tabla 3.1, la Dirección de Obra convocará inmediatamente a una reunión del comité para evaluación del análisis del evento presentado del procedimiento constructivo.
5. La dirección de obra informa inmediatamente en forma simultánea:

- a) Comité de monitoreo y asesores
 - b) Sub Secretario de Proyectos y Construcción
6. El comité evalúa la continuidad del procedimiento constructivo y/o correcciones al

3.3 SEMÁFORO ROJO

1. Monitoreo informa de manera inmediata a la Dirección Externa de la Obra del evento presentado.
2. Monitoreo proporciona inmediatamente la siguiente información tanto gráfica y numéricamente:
 - a) Localización del evento
 - b) Duración del evento
 - c) Desplazamiento
 - d) Velocidad
 - e) Aceleración
 - f) Frecuencia
 - g) Croquis de ubicación de sensores
3. La Dirección Externa de Obra suspende totalmente el proceso constructivo que implique equipo pesado.
4. La dirección de obra informa inmediatamente en forma simultánea a:
 - a) Comité de monitoreo y asesores
 - b) Sub Secretario de Proyectos y Construcción
 - c) Secretario de la SDUOP
5. El comité se reunirá inmediatamente para evaluación de los procedimientos constructivos y análisis del evento presentado.
6. El comité evalúa la continuidad del procedimiento constructivo y/o correcciones al mismo, en su caso.

El presente documento se deberá complementar y actualizar con la información y el comportamiento de la estructura del acueducto y del complemento de la instrumentación e información de monitoreo.

COMITÉ DE MONITOREO LOS ARCOS



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>