

Herramienta de análisis y control sísmico para el Viaducto de Autopista Urbana Norte (Ciudad de México)

SHM system for analysis and seismic assessment for the Viaduct of Autopista Urbana Norte (Mexico City)

Mariano AHIJADO GARCÍA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
OHL Concesiones.

Director de Obras y Mantenimiento Mayor

mahijado@ohlconcesiones.com

Alejandro HERNÁNDEZ GAYO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Torroja Ingeniería S.L.P.

Jefe de Proyectos

ahernandez@torroja.es

José Manuel SIMÓN-TALERO MUÑOZ

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Torroja Ingeniería S.L.P.

Director General

jsimontalero@torroja.es

Manuel SANTILLÁN PALENCIA

Ingeniero de Telecomunicaciones
Solvver Solutions S.L.

Director Técnico

manuel.santillan@gmail.com

Ignacio DE VILLAR MECA

Ingeniero Informático

Solvver Solutions S.L

Director

ignacio.devillar@solvver.com

RESUMEN

Este artículo presenta un innovador sistema para la evaluación del comportamiento sísmico de largos viaductos durante o después evento sísmico. Está basado en el empleo de un Sistema de Monitorización instalado en la estructura, junto con el de modelos teóricos de elementos finitos. La instrumentación proporciona información en tiempo real de la estructura, y el Sistema evalúa su capacidad de continuar en servicio tras la ocurrencia de un terremoto. Esta metodología se ha implementado por Torroja Ingeniería en el Viaducto de Autopista Urbana Norte (OHL México), una autopista de peaje elevada en Ciudad de México, con gran ocurrencia de episodios sísmicos.

ABSTRACT

In this article, we introduce an innovative approach for the seismic behavior assessment of great length viaducts during and after a seismic event. It is based on the combined use of a monitoring system installed at the structure and Finite Element Models. The sensors network provides real-time information about the structure, and its validity to continue in service after an earthquake. This methodology was performed by Torroja Ingeniería. in the Viaduct of Autopista Urbana Norte (OHL México), a toll elevated highway located at Mexico City, where there is high recurrence of seismic episodes.

PALABRAS CLAVE: instrumentación estructural, detección de daños, evento sísmico, tiempo real

KEYWORDS: structural health monitoring SHM, damage detection, seismic event, real-time

1. Introducción

En las últimas décadas, muchas ciudades han desarrollado grandes infraestructuras de transporte en su interior para hacer frente el incremento de tráfico. La construcción de viaductos de gran

longitud es una de las soluciones que se ha desarrollado más frecuentemente. Existen numerosos ejemplos de la utilización de los Sistemas de Monitorización Estructural (*Structural Health Monitoring SHM*) [1], pero normalmente focalizados en estructuras más reducidas y puentes singulares (puentes atirantados, colgantes, etc.). Sin embargo, el comportamiento de estas grandes infraestructuras en el caso de un evento sísmico es poco conocido. Una evaluación rápida y precisa de su estado tras la ocurrencia de un evento sísmico sería de gran utilidad para confirmar su estado de daños y su aptitud para el servicio. Esta información sería especialmente ventajosa en estructuras que forman parte de una concesión de peaje, para poder tomar la decisión de continuar con su operación de manera rápida y rigurosa tras el sismo.

En este artículo se describe la metodología que se ha desarrollado para conseguir estos objetivos, basada en el uso combinado de un sistema de monitorización instalado en la estructura, junto con el desarrollo y análisis de modelos de elementos finitos teóricos de la misma.

La red de sensores instalada proporciona, tras un complejo post-proceso, información en remoto y tiempo real sobre el comportamiento estático y dinámico de la estructura antes, durante o después de un evento sísmico, a través una Aplicación Web desarrollada a tal efecto. Con esta información se calibran además los modelos teóricos iniciales, y éstos se pueden usar para predecir el comportamiento teórico esperable en caso de terremotos de mayor intensidad, y así ajustar con más exactitud los niveles de alarma en el Sistema.

2. Aplicación al Viaducto de Autopista Urbana Norte. Aproximación

La metodología descrita en el apartado anterior, se desarrolló e implementó para el Viaducto de la Autopista Urbana Norte, una autopista urbana de peaje, construida y operada por OHL MEXICO, localizada en Ciudad de México. Esta autopista de doble calzada y tres carriles por sentido, discurre por un viaducto elevado de 10 kilómetros de longitud y 24 metros de ancho. Su trazado va de Sur a Norte por la zona Oeste de la ciudad, sobre el Anillo Periférico “Bulevar Manuel Ávila Camacho”. Teniendo en cuenta distribuidores y rampas de acceso al Viaducto principal, el conjunto de la Concesión tiene más de 15 kilómetros de estructura elevada.

Los tableros están diseñados con vigas pretensadas prefabricadas, con una sucesión de pórticos empotrados en las pilas, y entre ellos vigas tipo “Gerber” isostáticas, apoyadas a media madera en los voladizos de los pórticos anteriores. Entre las vigas de un vano y el siguiente se dispone una conexión que asegura la fijación entre ellas, tanto en sentido longitudinal como transversal.

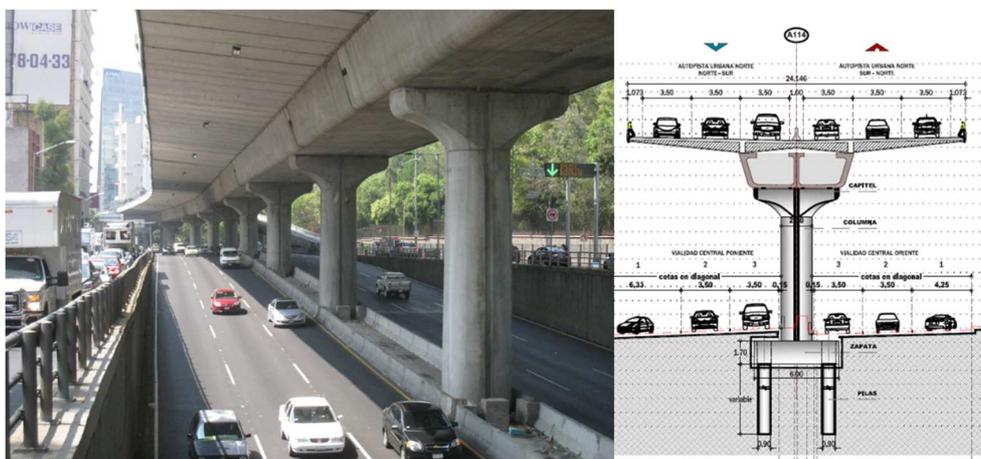


Figura 1. Viaducto elevado de Autopista Urbana Norte.

La peligrosidad sísmica de la zona es sobradamente conocida debida a la gran frecuencia de episodios sísmicos. Esta fue la motivación de la Concesionaria para iniciar un proyecto de instrumentación que pudiera reportarles el comportamiento de la estructura durante y tras un evento sísmico, desde el punto de vista de la seguridad, pero también de la funcionalidad.

El enfoque de este tipo de proyecto no era sencillo, ya que tenía fuertes condicionantes:

- La información debía ser transmitida en tiempo real para ser evaluada tan pronto como fuera posible.
- Por la gran extensión de la infraestructura, el sistema de sensores a instalar debía ser limitado en coste y cantidad. De lo contrario, sería económicamente inviable. Los modelos teóricos en gabinete proporcionarían la información de la estructura en las zonas donde no se dispone instrumentación.
- El estudio de eventos sísmicos, evidentemente fenómenos dinámicos, hacía necesario la instalación de acelerómetros en la estructura, que proporcionaran dicha información [2]. Estos sensores generan grandes volúmenes de datos, que debe ser gestionados y almacenados, por lo que la gestión de estas grandes volúmenes de información constituían un reto en sí mismo.

Por todos estos motivos, se planteó un Proyecto dividido en varias fases, que incluían un primera fase de estudios iniciales y un Anteproyecto, una ejecución de un Proyecto Piloto, y finalmente la redacción e implementación de un Proyecto definitivo, de tal forma que las conclusiones de cada una de las fases servía para mejorar y precisar más los desarrollos futuros, acotando los errores y posibles riesgos.

Las técnicas basadas en la detección de daños debido a los cambios en sus características dinámicas (*Vibration-Based Damage Identification Methods, VBDIM*) [3-4] fueron estudiadas pero descartadas. Debido a las particularidades de la tipología de este viaducto (con un fuerte grado de hiperestatismo y muchas singularidades en la traza), no estaba claro que estas técnicas pudieran proporcionar la información que se buscaba, y serían muy difíciles de interpretar.

Los primeros estudios mostraban que los puntos más sensibles de la estructura ante la ocurrencia de un evento sísmico eran los apoyos a media madera entre vigas sucesivas, y la subestructura, concretamente su movimiento y giro transversal. Por ello, se decidió que la instrumentación a disponer estaría formada por galgas de desplazamiento simples y de bajo coste instaladas en las juntas, que podrían generar una alarma ante un desplazamiento no esperado en las conexiones, y por acelerómetros en la subestructura, que, tras un algoritmo de doble integración desarrollado específicamente para este proyecto, nos permitieran conocer los desplazamientos máximos y remanentes durante y tras un evento sísmico, y que nos proporcionaran información sobre un posible daño en la misma.

3. Estudios previos y Proyecto Piloto

Debido a la gran complejidad y magnitud del proyecto a desarrollar se llevaron a cabo dos tareas iniciales antes de la ejecución del proyecto final:

- Test de laboratorio de una serie de acelerómetros comerciales y desarrollo y programación del algoritmo de doble integración para el cálculo de desplazamientos.
- Ejecución de un Proyecto Piloto en un tramo representativo del Viaducto.

3.1. Test de laboratorio

El equipo del Centro de Modelado en Ingeniería Mecánica (CEMIM) de la Escuela de Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid llevó a cabo esta serie de pruebas de laboratorio, cuyo objetivo era determinar la sensibilidad y el nivel de ruido de varios tipos de acelerómetros en las bandas de interés para nuestro Proyecto, que se esperaba estuvieran próximas a 1-2 Hz.

Se ensayaron y compararon hasta 11 acelerómetros de distintas marcas, precisiones, rangos de medida y coste, utilizando un vibrador electrodinámico (*shaker*), donde se montaba cada uno de los acelerómetros, registrando sus medidas de aceleración.



Figura 2. Acelerómetros ensayados y shaker

Además de los ensayos antes descritos, sobre los modelos seleccionados se programaron en el shaker una serie de terremotos reales, registrando a la vez los datos de aceleraciones, pero también los desplazamientos reales, medidos mediante un potenciómetro externo.

Se desarrolló un algoritmo de doble integración a partir de las aceleraciones registradas, que se calibró mediante los datos reales de desplazamiento medidos. Dicho algoritmo se ha demostrado estable y suficientemente preciso, programándose en el Sistema y proporcionando datos de desplazamientos de la estructura en tiempo real para su consulta. Este cálculo de los desplazamientos es la pieza fundamental del Sistema.

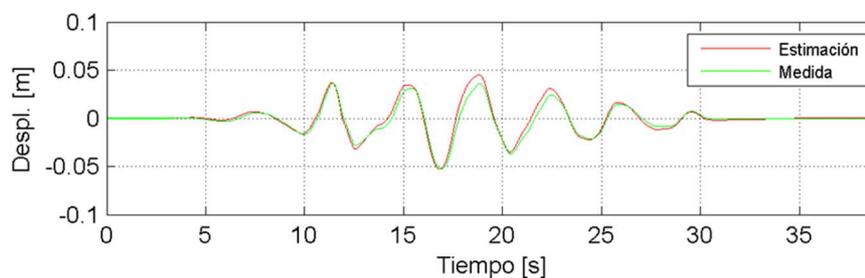


Figura 3. Resultados del algoritmo de desplazamiento en comparación con la medición real

3.2. Proyecto Piloto

El Proyecto Piloto ha consistido en la instalación de un sistema de instrumentación en un tramo representativo de la estructura, mientras que en paralelo, se desarrollaba la herramienta software y los modelos de cálculo de la estructura.

La realización de este proyecto buscaba los siguientes objetivos:

- Poder ajustar en función de los resultados los enfoques de instrumentación inicialmente propuestos.
- Seleccionar las tecnologías óptimas de instrumentación y comunicaciones, acotando de este modo el coste del proyecto.
- Caracterizar de forma más realista el comportamiento dinámico de la estructura (en dicho tramo, extrapolable a otros tramos de similares características), conociendo con mucha exactitud las frecuencias y modos propios de la estructura.
- Disponer de un modelo teórico ya ajustado y calibrado, que ha permitido realizar extrapolaciones a diferentes secciones y bajo distintos escenarios solicitantes. En dicho modelo, se han estimado las frecuencias propias, comparándolas con las medidas en la realidad, calibrando las condiciones de contorno apropiadas [5].

El tramo seleccionado se buscó que fuera lo más representativo posible dentro de toda la infraestructura, seleccionando un tramo de 150 metros, en el que se instalaron una serie de sensores en la subestructura y en la superestructura, que se usaron para caracterizar dinámicamente el viaducto, haciendo un análisis operacional modal identificando los modos propios, frecuencias propias y ratios de amortiguamiento [6].

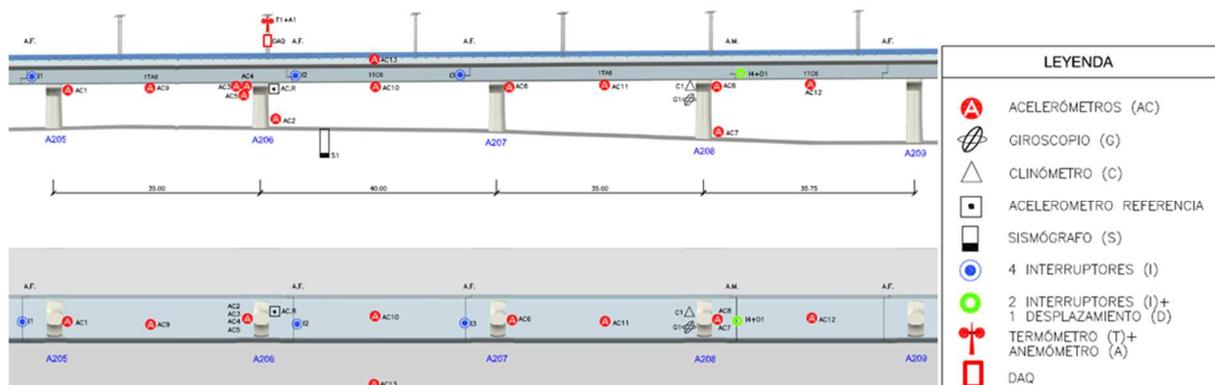


Figura 4. Red de sensores instalada en el Proyecto Piloto

Desde Julio de 2014 se están obteniendo lecturas de manera continua de los sensores instalados, y se pueden consultar, online y en tiempo real a través de la aplicación desarrollada. Se caracterizó dinámicamente la estructura mediante técnicas OMA (*Operation Modal Analysis*) a partir de los datos de la excitación natural de la estructura, sin necesidad de ninguna vibración forzada [7].

Las frecuencias transversales entre 1-2 Hz, donde existen 4 modos propios, son las que más influyen en el comportamiento de la estructura. Estas 4 frecuencias movilizan el 80% de la masa, siendo la primera de ellas, la frecuencia de 1.18 Hz, la correspondiente al movimiento lateral de todo el conjunto del viaducto.

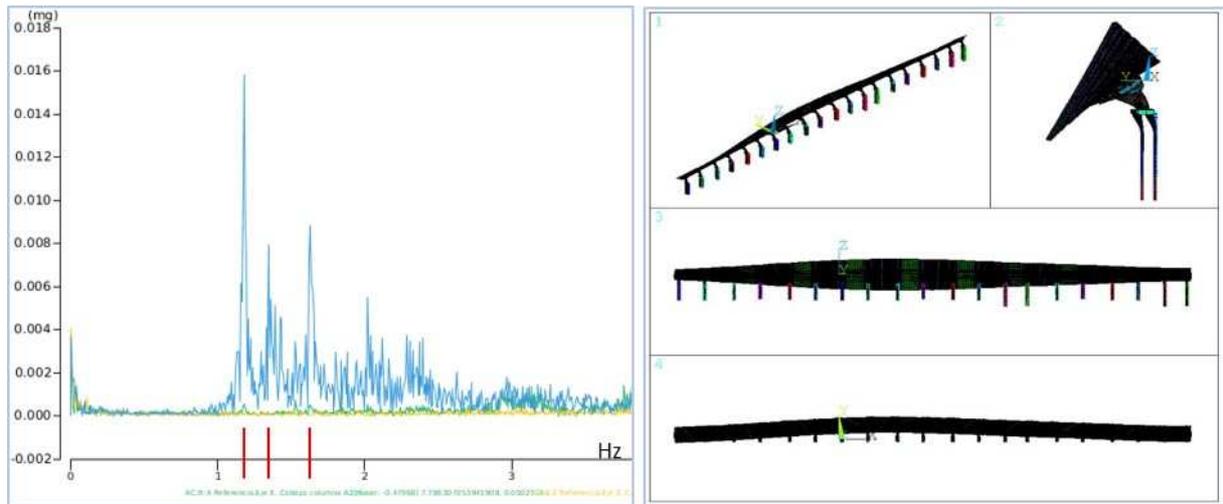


Figura 5. Frecuencias propias (azul=transversal;verde=long;amarillo=vert.). Primer modo transversal

4. Arquitectura general de la Herramienta de Análisis y Control Sísmico

El diseño de la Herramienta tenía dos desafíos principales: por un lado, los requerimientos de ingeniería implicaban grandes volúmenes de información que procesar y almacenar, y por otro, los requerimientos operativos exigían el diseño de una herramienta vía web, en tiempo real, donde los datos debían fluir continuamente desde los sensores hasta la aplicación, pasando por los filtrados de señal, algoritmos de ingeniería, algoritmos de evaluación de daños y nivel de respuesta, etc.

El Sistema se ha montado sobre la plataforma *solview*, una plataforma vía web especialmente diseñada para la monitorización de estructuras, proporcionando información en tiempo real de los equipos en campo instalados.

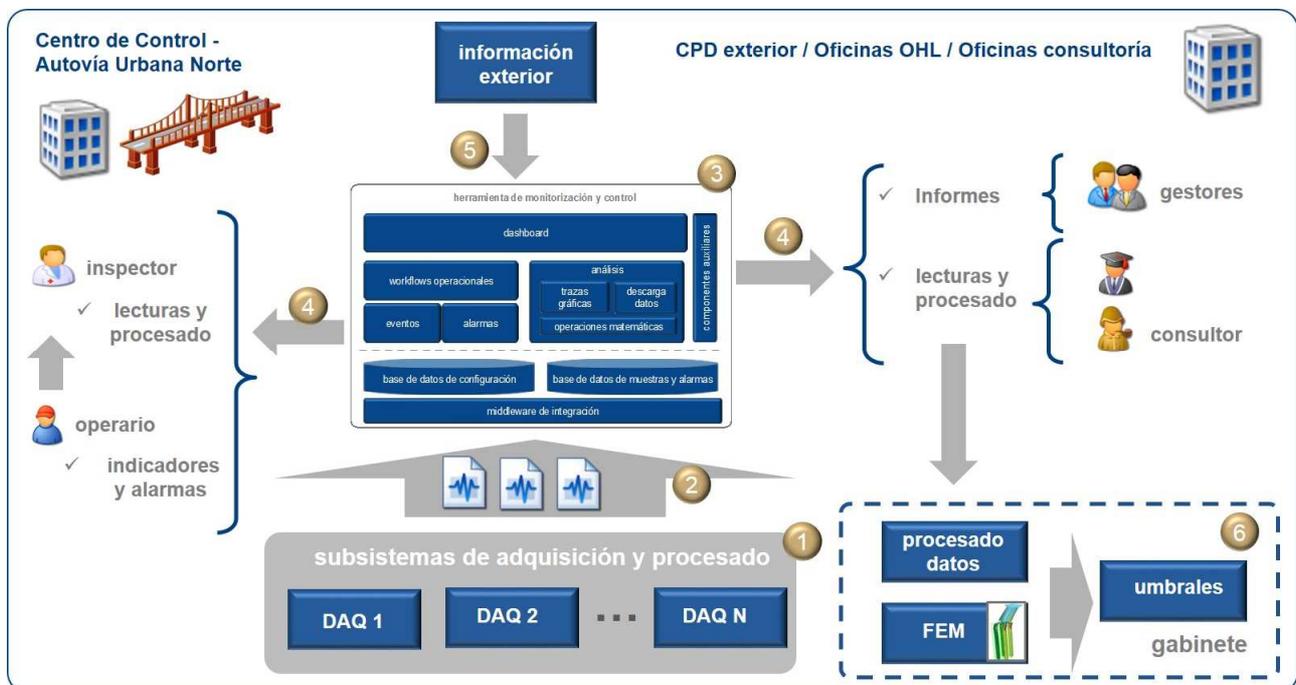


Figura 6. Arquitectura general de la Herramienta de Análisis y Control Sísmico

La figura anterior proporciona una vista general del flujo de información en el Sistema:

- 1- Adquisición de datos y etapa de pre-proceso. En esta etapa se integran los algoritmos de detección de eventos.
- 2- Los datos ya procesados se transmiten a la aplicación que está alojada en la nube, primero a través de la fibra óptica existente en la infraestructura, y posteriormente vía internet desde el Centro de Control de AUN.
- 3- En el Sistema central los datos se almacenan, y a la vez se ejecutan los cálculos de desplazamientos y resto de funcionalidades de la herramienta.
- 4- Los datos se transmiten finalmente a la aplicación del usuario, que para consultarlos en tiempo real, sólo requiere de una conexión a internet.
- 5- En el Sistema puede integrarse información externa como reportes de sismos, de inspecciones, comentarios, o cualquier documentación relevante y que queda almacenada asociada a dicho evento sísmico.
- 6- Toda esta información generada puede ser utilizada por los equipos de ingeniería para calibrar los modelos de cálculo, que a su vez servirá para ajustar más los límites de alarma.

5. Modelos teóricos estructurales e índice de daño

Se han desarrollado dos grupos de modelos teóricos de la estructura.

5.1. Modelos lineales de caracterización dinámica

Estos modelos se emplean para caracterizar dinámicamente la estructura, y los resultados obtenidos se comparan con los reales medidos. Partiendo de una primera versión diseñada a partir de los planos constructivos del viaducto, se ajustaron las condiciones de contorno (especialmente la geotecnia y el tamaño del modelo) para que finalmente reflejaran la realidad con mucha exactitud. Estos modelos se emplean también para el estudio de eventos sísmicos teóricos, de mayor intensidad, y así poder predecir el comportamiento de la estructura frente a ellos.

5.2. Modelos no lineales. Capacidad e índice de daño

Para evaluar la respuesta y la capacidad de la subestructura frente a las cargas derivadas de eventos sísmicos, se generan este segundo grupo de modelos teóricos, formados por un pórtico aislado, sobre el que se realiza un análisis *push-over* en las dos direcciones principales [8]. La contrastación empírica indica que este tipo de análisis arroja resultados aceptables en este sentido, describiendo con una precisión aceptable la respuesta de esquemas estructurales complejos sometidos a la acción sísmica.

El análisis *push-over* es un tipo de análisis estático, no lineal, en el que la estructura es sometida a una carga incremental, proporcional a un patrón de carga preestablecido. Al incrementar el nivel de carga, se determina la secuencia de daños que aparece en la estructura para cada nivel de deformación. La práctica habitual consiste en correlacionar este patrón de carga con las formas modales correspondientes a los primeros modos de vibración de la estructura

El modelo incorpora el acero armado y pretensado real de cada elemento, y se ha utilizado para determinar la capacidad resistente de la estructura, obteniendo información del comportamiento no-lineal del conjunto columna-cimentación, como por ejemplo la secuencia de secciones que van fisurando o ingresando en rango inelástico (tanto el acero como el hormigón). El modelo también considera efectos de segundo orden geométrico, propios de soportes comprimidos

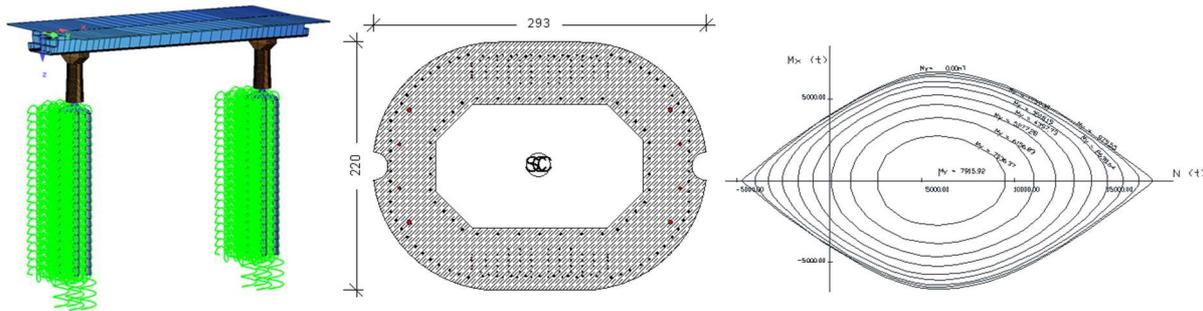


Figura 7. Modelos de cálculo no lineales y diagrama de interacción de una columna tipo

Para cada columna del modelo, se calculan sus curvas de capacidad, que definen el esfuerzo cortante obtenido en la base de las columnas, en función del desplazamiento total del punto de referencia, que es la cabeza de dicha columna.

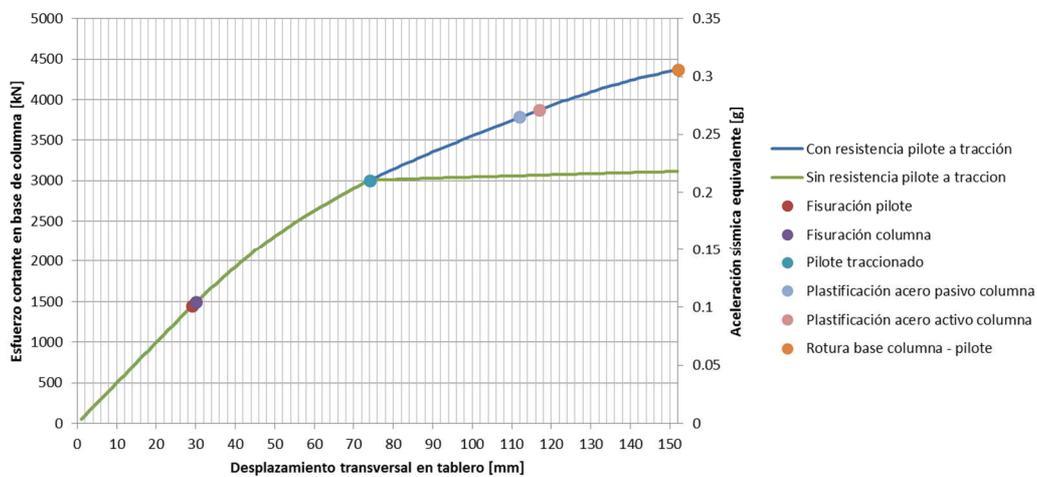


Figura 8. Curva de capacidad de una columna tipo, y secuencia de daños

Las curvas de capacidad así obtenidas, se integran dentro del Sistema, y servirán de comparación para concluir si el desplazamiento reportado durante un evento sísmico ha podido generar algún daño o no en la estructura. Se han estudiado la implantación de diversos índices de daño, seleccionando finalmente el índice de Powell y Allahabadi [9] por su simplicidad:

$$DI_{PL} = \frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} \leq 1 \text{ con } \delta_m \geq \delta_y \quad (1)$$

Donde δ_m es el desplazamiento lateral máximo experimentado por la columna durante el evento sísmico. δ_y es el desplazamiento para el que se produce la plastificación de las armaduras en base de columna, y δ_u es el desplazamiento lateral máximo bajo cargas monótonas crecientes, resultado del análisis *push-over* realizado.

Aunque este índice puede subestimar la relevancia de un daño en niveles muy avanzados por el efecto de las cargas cíclicas y por no tener en cuenta la pérdida de energía histerética [10-11], se considera que es lo suficientemente aproximado para el objetivo buscado.

Aplicando este índice a la curva del *push-over*, se programan unos límites de desplazamiento asociados a unos niveles de respuesta [12], que serán los que pongan en marcha uno u otro protocolo de actuación, en función de la gravedad del sismo.

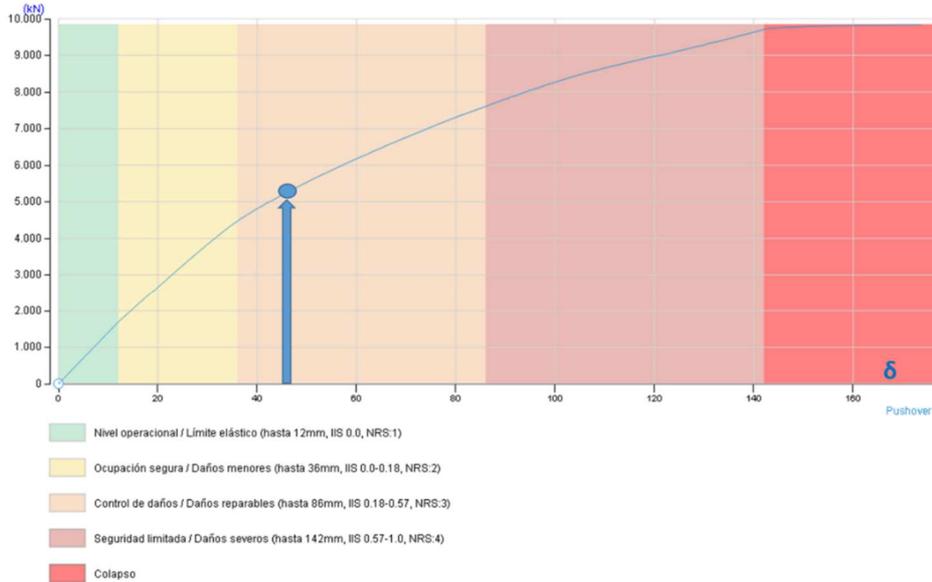


Figura 9. Curva de capacidad y niveles de respuesta

6. Herramienta de Análisis y Control Sísmico

La principal funcionalidad de la Herramienta es la de informar en tiempo real, a partir del cálculo del desplazamiento máximo, el nivel de daño generado en la estructura por un determinado evento sísmico, y los protocolos de actuación a seguir en función de dicho nivel de gravedad. Para ello, la Herramienta tiene implementado un sistema de alarmas y notificaciones vía email a los responsables del mantenimiento de la infraestructura.

Pero para que de verdad se trate de una Aplicación completa y útil para los usuarios, se han desarrollado varias funcionalidades adicionales:

- Módulo de dashboard o resumen ejecutivo
- Módulo de eventos sísmicos, donde se almacena toda la información de los mismos, siempre disponible para su consulta, y que genera resúmenes de datos más relevantes.
- Módulo de informes, que reporta un resumen mensual o anual de los sismos ocurridos.
- Módulo de canales, donde se puede consultar en tiempo real todos los canales de lectura de sensores (aceleraciones), tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, y los desplazamientos existentes calculados.
- Módulo de protocolos de actuación, en función del nivel de respuesta calculado.
- Módulos de administrador y ayuda.

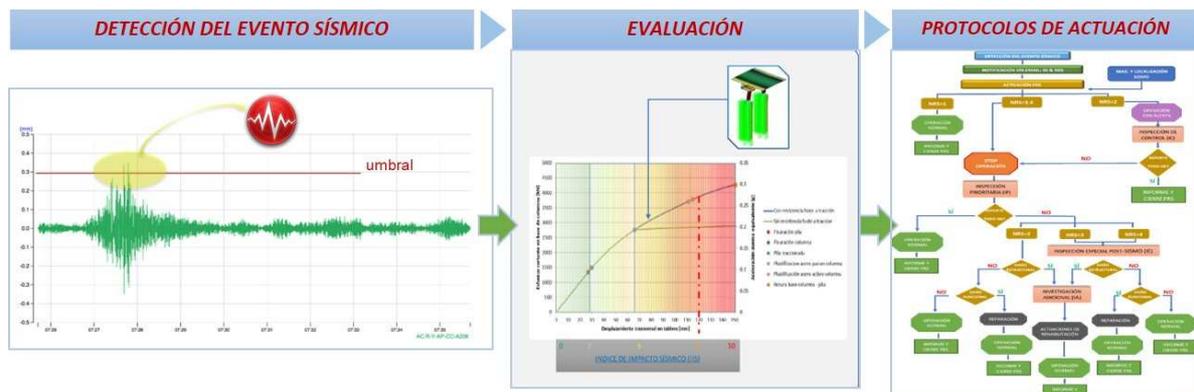


Figura 10. Esquema principal de la Herramienta: detección, evaluación y decisión de la actuación

7. Eventos sísmicos

Hasta la fecha están registrados en el Sistema hasta 20 eventos sísmicos de magnitud mayor a 5.0, siendo el más relevante para la estructura el que se produjo el 29 de Julio de 2014, de magnitud 6.3, con epicentro en Veracruz, y que provocó desplazamientos máximos de 2 milímetros pico a pico en el tablero. Este sismo se utilizó para calibrar los modelos teóricos desarrollados: se introdujo en los mismos el historial de aceleraciones registrados por el sismógrafo, obteniendo el historial de desplazamientos durante el terremoto de forma teórica, comprobando un muy buen ajuste entre modelos y realidad.

El estudio de este evento sísmico también sirvió para apreciar la preponderancia del primer modo de flexión transversal simétrica respecto al resto.

Referencias

- [1] P. Hipley, M. Huang, Bridge instrumentation and post-earthquake evaluation of bridges, SMIP89 Seminar Proceedings, 1989, pp. 53-71
- [2] Y. Arici, K.M. Mosalam, System identification and modelling of bridge systems for assessing current design procedures, SMIP2000 Seminar Proceedings, 2000, pp. 77-95.
- [3] L. Wang, T.H.T. Chan, Review of Vibration-Based Damage Detection and Condition Assessment of Bridge Structures using Structural Health Monitoring, Queensland University of Technology, 2009
- [4] S. Doebling, C. Farrar, M. Prime, A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods, Los Alamos National Laboratory, 1998.
- [5] H. Lus, R. Betti, R.W. Longman, Identification of linear structural systems using earthquake induced vibration data, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, pp. 1449-1467.
- [6] R. Clough, J. Penzien, Dynamics of structures, Computers & Structures, Inc., Berkley, 2003.
- [7] C.H. Loh, Z.K. Lee, Seismic monitoring of a bridge: Assessing dynamic characteristics from both weak and strong ground motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, pp. 269-288.
- [7] Applied Technology Council (ATC), Seismic Evaluation and Retrofit of concrete buildings. Report ATC-40, Redwood City, California, 1996
- [9] G.H. Powell, R. Allahabadi, Seismic damage prediction by deterministic methods: concepts and procedures, Earthq Eng and Struct Dynam 1988;16: 719–34.
- [10] Y.J. Park, AHS Ang. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4), pp. 722-739.
- [11] A. Bassam, A. Iranmanesh, F. Ansari, A simple quantitative approach for post earthquake damage assessment of flexure dominant reinforced concrete bridges, Engineering Structures 33 (2011), 3218-3225
- [12] H.J. Jiang, L.Z. Chen, Q. Chen, Seismic Damage Assessment and Performance Levels of Reinforced Concrete Members, Procedia Engineering 14 (2011), 939-945