

## 55. INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

### 41. RECOMENDACIONES PARA LA PRODUCCIÓN DE ZAPATAS COLUMNAS PRETENSADAS DE LAS AUTOPISTAS ELEVADAS DE CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE EL MÉTODO DE LA MADUREZ

#### RECOMMENDATIONS FOR THE PRODUCTION OF PRESTRESSED PRECAST COLUMN-FOOTINGS ON THE ELEVATED HIGHWAYS SEGUNDOS PISOS IN MEXICO CITY BASED ON CONCRETE MAT

Cristina Vázquez Herrero. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Profesora Titular Universidad. Dra. ICCP. cvazquezh@udc.es

Roberto Meli Piralla. Instituto de Ingeniería UNAM. Investigador

Emérito. Dr. Ingeniero Civil. rmep@pumas.iingen.unam.mx

Carlos Aire Untiveros. Instituto de Ingeniería UNAM. Académico

Instituto de Ingeniería-UNAM. Dr. Ingeniero Civil.

aire@pumas.iingen.unam.mx

Miguel Ángel Dircio Bautista. Instituto de Ingeniería UNAM. Estudiante de Maestría. Maestro Ingeniero Civil. mdirciob@gmail.com

Carlos Javier Mendoza Escobedo. Instituto Ingeniería UNAM.

Investigador Titular. Maestro Ingeniero Civil.

cjm@pumas.iingen.unam.mx

Método de la madurez, efecto cross-over, hormigón autocompactante, hormigón pretensado.

*Concrete maturity method, cross over effect, self-compacting concrete, prestressed concrete.*

El objetivo de la investigación es optimizar la producción de las zonas columnas prefabricadas pretensadas de las autopistas elevadas Segundos Pisos de Ciudad de México, aplicando el método de la madurez. Para ello se estudia el efecto combinado del tiempo y de la temperatura en la evolución temporal de las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante de alta resistencia de las zonas-columnas. El análisis de los resultados obtenidos ha permitido revisar el método de curado, y establecer la edad de transferencia mínima, de forma que se minimizan los costes y plazos de producción.



Construcción de la estructura de las autopistas elevadas, Segundos Pisos, Ciudad de México



Instrumentación de una zapata-columna prefabricada pretensada

### 42. APPLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ARMATURE.ES A LA REDUCCIÓN DE PLAZOS DE CONSTRUCCIÓN DE PUENTES DEL EJE ATLÁNTICO DE ALTA VELOCIDAD

#### APPLICATION OF THE METHODOLOGY ARMATURE.ES TO REDUCE CONSTRUCTION DEADLINES OF TWO BRIDGES ON THE HIGH SPEED ATLANTIC RAILWAY, SPAIN

Cristina Vázquez Herrero. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Profesora Titular. Universidad. Dra. ICCP. cvazquezh@udc.es

Gustavo Vázquez Herrero. Cimarrq SL. Director General. ICCP.

gustavo.vazquez@cimarrq.es

Susana Lenguas Gil. Arias Hermanos. Prev. Jefa de Grupo de Obras. ICCP. susana.lenguas@icloud.com

Félix Sánchez Tembleque. CITEC. Profesor. Dr. Ingeniero Industrial.

fsanchez@udc.es

Método de la madurez, ensayos no destructivos, lechada, grout, hormigón de alta resistencia.

*Concrete maturity method, non-destructive testing, grout, high strength concrete.*

Durante la construcción de los viaductos de O Marco y Ulló del Eje Atlántico de Alta Velocidad, del tramo UTE Vilaboa (Aldesa y Arias Hermanos) se aplicó un nuevo procedimiento basado en el método de la madurez según la ASTM C1074-2011. La metodología armature.es permitió el diseño ecológico de la dosificación de hormigón, minimizando la cantidad de cemento por metro cúbico. Durante toda la construcción de los viaductos de O Marco y Ulló no se produjo ninguna baja de resistencias, ni problemas derivados de la falta de curado del tablero, gracias al compromiso de todos los agentes intervenientes en la obra: dirección de obra, empresa constructora, oficina técnica, plantas del hormigón, laboratorio de control de calidad externo, y equipo de armature.es (investigadores de la Universidad de La Coruña e ingenieros de CIMARQ).

Se ha constatado que existe una variación considerable de temperaturas internas entre las diferentes zonas de la sección transversal, de hasta un 30% respecto a la temperatura mínima en la fase estudiada, debido a la diferencia de espesores de hormigón y al efecto de aislante térmico del encofrado. Debido a esta falta de uniformidad de la temperatura interna se desaconseja emplear "match curing", sien-



Instrumentación del tablero del viaducto de O Marco, Eje Atlántico



Instrumentación del ambiente y de las probetas de control

do aconsejable el método de la madurez (ASTM C1074.11), y concretamente la metodología desarrollada armature.es.

Se propone incluir el método de la madurez en los Eurocódigos y en la normativa española. Se sugiere redefinir en la futura normativa el concepto de edad del hormigón, sustituyéndolo por el concepto de índice de madurez o edad equivalente, en aras de la seguridad laboral y estructural.

## 72. TÉCNICAS DE INSPECCIÓN GPR EN CONSTRUCCIÓN: APLICACIÓN ANDROID PARA EL PROCESADO DE SEÑAL

### GPR INSPECTION TECHNIQUES IN CONSTRUCTION: ANDROID APP FOR SIGNAL PROCESSING

Francisco Javier Prego Martínez. Extraco, S.A. y Misturas, S.A.

Dpto. I+D+i. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

[javiprego.extraco@gmail.com](mailto:javiprego.extraco@gmail.com)

Luis Antonio Nieto Matarranz. Abakal Ingenieros, S.L. Dpto. I+D+i.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [lnieto@abakal.com](mailto:lnieto@abakal.com)

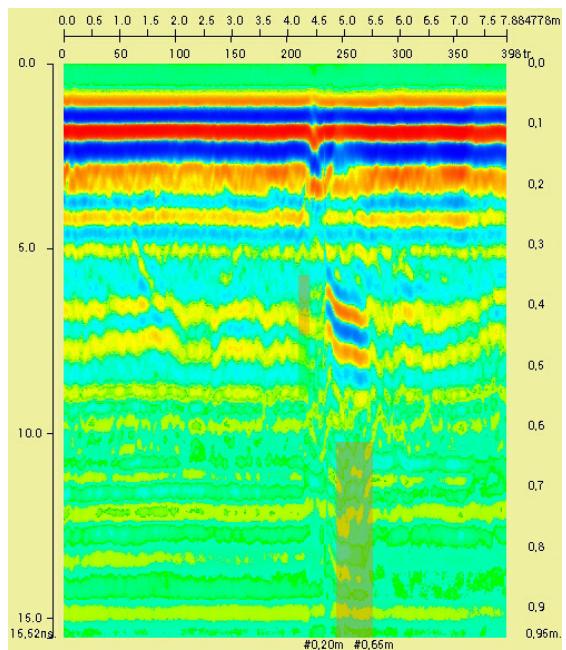
M.ª Mercedes Solla Carracel. Centro Universitario de la Defensa-Escuela Naval Marín. Profesora. Dra. Ingeniera de Montes.

[merchisolla@cud.uvigo.es](mailto:merchisolla@cud.uvigo.es)

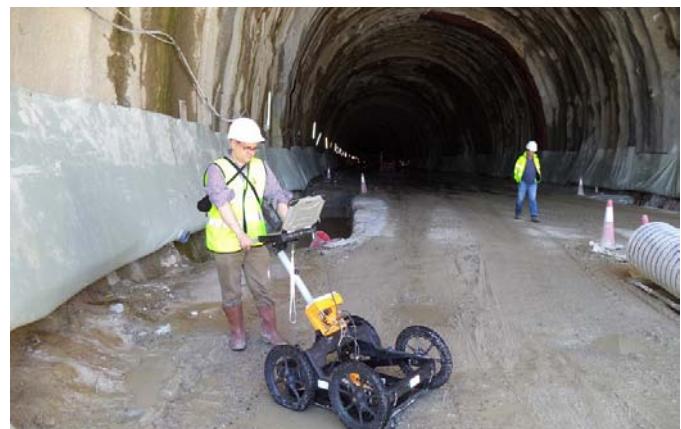
Georadar, inspección, construcción, procesado, mediciones.

Georadar, inspection, construction, processing, measurements.

El empleo de tecnologías Georadar (Ground Penetrating Radar, GPR) en el control y análisis de obras de ingeniería civil ha alcanzado un notable desarrollo en las últimas décadas, especialmente en lo referente a la monitorización de grandes infraestructuras del transporte (viarias y ferroviarias). El GPR ha demostrado ser una técnica de análisis no destructiva (TND) fiable y asequible económicamente en la inspección de estructuras presentes en viaductos, puentes y túneles, usándose para la medición de espesores de pavimentos y recubrimientos, profundidad de grietas o en la detección de armaduras y elementos embebidos en el hormigón estructural. Sin embargo, el procesado e interpretación posterior de la señal GPR es una labor compleja, que dificulta la expansión de estas técnicas en el ámbito de la construcción, por requerir del empleo de programas informáticos comerciales difíciles de manejar y no siempre gratuitos. Este trabajo presenta el de-



Ejemplo de radargrama procesado con app



Medición con GPR en un túnel

sarrollo de una aplicación en sistema operativo Android, que permite el procesado básico de la señal en dispositivos smartphone y tablet. Se trata de una herramienta gratuita, sencilla, intuitiva y de fácil acceso, que agiliza el tratamiento de la señal y la obtención de resultados preliminares, implementando filtros que optimizan el procesado de las imágenes y facilitan la realización de mediciones e informes de campo al pie de la misma estructura.

### 131. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE FIABILIDAD $\beta$ DE HORMIGONES ESPAÑOLES SOMETIDOS A LAS CLASES DE EXPOSICIÓN XC Y XS

#### RELIABILITY INDEX $\beta$ DETERMINATION FROM A SET OF CONCRETES SUBMITTED TO THE XC AND XS EXPOSURE CLASSES

Carmen Andrade Perdrix. IETcc-CSIC. Profesora de Investigación.

Dra. Química Industrial. andrade@ietcc.csic.es

Rosario Martínez Lebrusant. IECA. Jefa del Área de Certificación y Hormigones. Dra. en Ciencias Químicas. charoml@ieca.es

Miguel Ángel Sanjuán Barbudo. IECA. Jefe del Área de Cementos y Morteros. Dr. en Ciencias Químicas. masanjuan@ieca.es

Nuria Rebollo Rámos. IETcc-CSIC. Ayudante de Investigación.

Ingeniera Química e Ingeniera Técnica Industrial. nuriare@ietcc.csic.es

Durabilidad, hormigón, modelos, fiabilidad, vida en servicio.

*Durability, concrete, models, reliability, servicelife.*

En el Código Modelo, MC2010, se han incluido recientemente unos modelos para mejorar la estimación de la durabilidad y ampliar la vida en servicio del hormigón estructural, los cuales se basan en algunas propiedades de transporte como lo es el coeficiente de difusión del agente agresivo. Además de los modelos, el MC2010 contiene un enfoque probabilista para realizar los cálculos relativos a la durabilidad del hormigón que han promovido un cierto interés para llevar a cabo la verificación de las especificaciones tradicionales utilizando modelos. En este artículo se ha realizado dicha verificación empleando unos 60 hormigones fabricados en diferentes lugares de España con los que se han realizados ensayos de carbonatación natural y penetración de iones cloruro por difusión natural, conforme con las normas europeas CEN/TS 12390-10 y CEN/TS 12390-11, respectivamente. El contenido de cemento estaba comprendido entre 275 y 500 kg y la relación agua/cemento entre 0,37

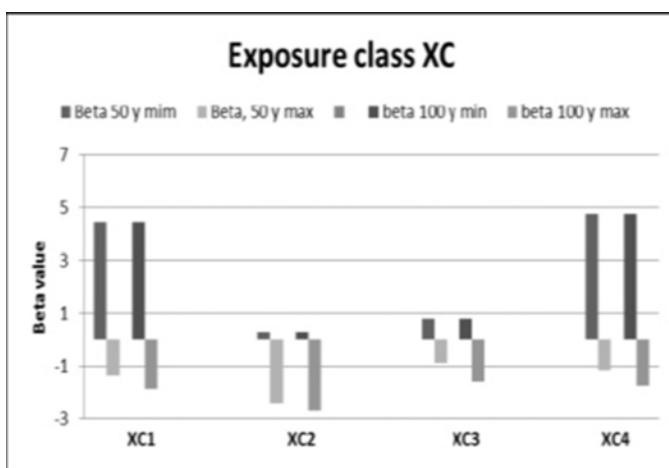


Figura 2. Índice/fiabilidad de la velocidad de carbonatación para una vida en servicio de 50 y 100 años

y 0,65. El hormigón se curó durante 28 días en cámara húmeda. Los resultados de carbonatación obtenidos en todos los hormigones se clasificaron y ordenaron de tal forma que cumplieran con las especificaciones de la norma europea de hormigones EN 206 en función de cada ambiente de exposición normalizado (fig. 1). Con relación a la resistencia a compresión, se observó una tendencia que iba desde los valores mínimo al máximo. Este enfoque también se puede adoptar en el caso de la velocidad de carbonatación. La figura 2 presenta el índice de fiabilidad ( $\beta$ ) para los valores mínimo y máximo de la velocidad de carbonatación para una vida en servicio nominal de 50 y 100 años.

### 160. LOSA DE LA ESTACIÓN DE LA SAGRERA: ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE LA RETRACCIÓN DIFERENCIAL POR SECADO

#### SLAB OF THE SAGRERA STATION: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF THE DIFFERENTIAL DRYING SHRINKAGE

Albert de la Fuente Antequera. Universitat Politècnica de Catalunya. Profesor Lector. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. albert.de.la.fuente@upc.edu

Ana Cuartero Rodríguez. Bridge Technologies. Técnica de Proyectos. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. ana.cuartero@btechno.es

Ángel Aparicio Bengoechea. Universitat Politècnica de Catalunya. Catedrático de Universidad. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. angel.carlos.aparicio@upc.edu

Autotensiones, cuantías mínimas, losa de gran canto, retracción, transferencia de humedad.

*Humidity transfer, minimum reinforcement, self-equilibrated stresses, shrinkage, thick slab.*

Para la futura estación ferroviaria intermodal de La Sagrera (Barcelona) se proyectan cinco niveles; en el inferior se albergaran los andenes de la red de Cercanías y, a tal fin, se diseña una losa de fondo de hormigón armado con canto de entre 2,0 m y 3,5 m. La losa tiene una superficie aproximada de 48.000 m<sup>2</sup> e involucra la producción de alrededor de 120.000 m<sup>3</sup> de hormigón. Consecuentemente, la optimización tanto de la composición del hormigón como de la cuantía de acero son aspectos determinantes para la economía de la obra.

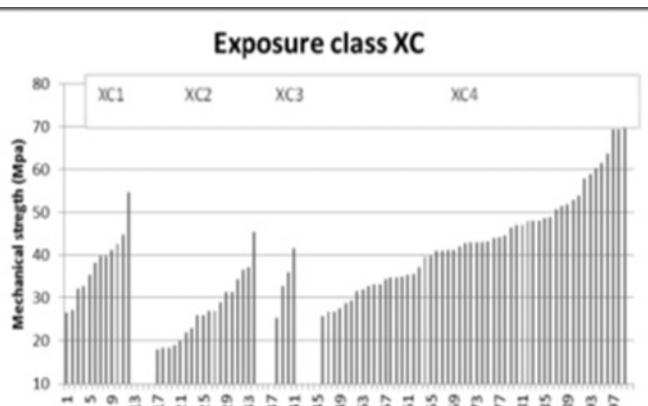


Figura 1. Resistencia a compresión a 28 días. Hormigones clasificados según exposición de carbonatación XC

En este sentido la mayor parte de la losa requiere de una cuantía mínima para hacer frente a los estados tensionales derivados del intercambio inicial de temperatura y de los efectos de la retracción; estos últimos ocasionan: (1) autotensiones equilibradas debidas al secado diferencial de las fibras de hormigón (fig. 1) y (2) coacción lateral derivada del bloqueo de las juntas.

Las normativas nacionales e internacionales proponen cuantías de armadura que oscilan entre el 1,8% y el 6,0% de la sección transversal del hormigón; si bien, estas cuantías no tienen en cuenta aspectos determinantes como: (1) la dosificación del hormigón (y por tanto tampoco su potencial de retracción); (2) las condiciones termo-higrométricas y (3) el canto de la sección transversal. En consecuencia, se trata de un rango de valores amplio y que, a falta de un estudio exhaustivo, puede ser inadecuado para la losa diseñada.

Para estimar la cuantía óptima de armadura, se debe resolver el problema de la transferencia de humedad y conocer la evolución de los perfiles de retracción. Se desarrolla una campaña experimental en el laboratorio de Tecnología de Estructuras Lluís Agulló de la UPC en la que se caracteriza la retracción en prismas con distintas dosificaciones de hormigón y en condiciones ambientales controladas. En paralelo, se ejecutan en las mismas instalaciones de la obra 6 datos de hormigón de dimensiones  $1,2 \times 2,4 \times 2,0 \text{ m}^3$  (fig. 2) con dos cuantías distintas de refuerzo, dos dosificaciones de hormigón y condiciones de curado distintas. En estos se mide la evolución interna de las temperaturas así como las deformaciones en varias fibras de hormigón y del acero.

Los resultados se analizan y se emplean para calibrar un modelo higro-mecánico que ha permitido estimar los estados tensionales de

la sección transversal y optimizar el refuerzo para distintos escenarios de ejecución de la losa y condiciones termo-higrométricas.

## 188. AVANCES EN EL DESARROLLO DE LAS PRIMERAS RECOMENDACIONES DE DISEÑO EN ESPAÑA PARA EL HORMIGÓN DE MUY ALTO RENDIMIENTO

**ADVANCES IN THE DEVELOPMENT OF THE FIRST ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBRE REINFORCED CONCRETE RECOMMENDATIONS IN SPAIN**

Pedro Serna Ros. Universitat Politècnica de València. Presidente del Grupo 1.6 de la Comisión 1 de ACHE. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [pserna@cst.upv.es](mailto:pserna@cst.upv.es)

Juan Ángel López Martínez. Research & Development Concretes S.L. Socio Fundador. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [jlopez@rdconcrete.com](mailto:jlopez@rdconcrete.com)

Recomendaciones, diseño, HMAR.

Recommendations, design, UHPFRC.

El HMAR ha demostrado ser un material prometedor para el desarrollo de aplicaciones en arquitectura e ingeniería civil gracias a la labor de investigación y a las aplicaciones llevadas a cabo durante la última década. Sin embargo, todavía queda un largo camino para conseguir que este material sea visto como una alternativa real en el que hay que dar respuesta a: (i) elevado coste de las materias primas; (ii) falta de experiencia de las ingenierías para encontrar sistemas específicos de construcción y diseños adaptados a las posibilidades del HMAR; (iii) necesidad de códigos de diseños específicos para el HMAR; (iv) dificultad a la hora de evaluar los beneficios económicos y ambientales a largo plazo de las estructuras de HMAR.

Con el objetivo de promover el uso del HMAR en la ingeniería española para que ésta pueda mantenerse a la vanguardia mundial en el sector de la construcción, se constituyó en noviembre de 2015 el grupo de trabajo 1.6 de la Comisión 1 de ACHE con el objetivo de desarrollar las primeras recomendaciones para el diseño de estructuras mediante HMAR. En este documento se presenta un resumen de los aspectos más relevantes desarrollados hasta el momento.

En primer lugar se presentan los requisitos que debe cumplir un hormigón para poder incluirse dentro del grupo de los HMAR, así como la propuesta de tipificación que permite un diseño sencillo de las estructuras proyectadas con HMAR. A continuación se presentan las ecuaciones constitutivas de diseño y un breve repaso de los aspectos más importantes del diseño en los estados límite de servicio y últimos.

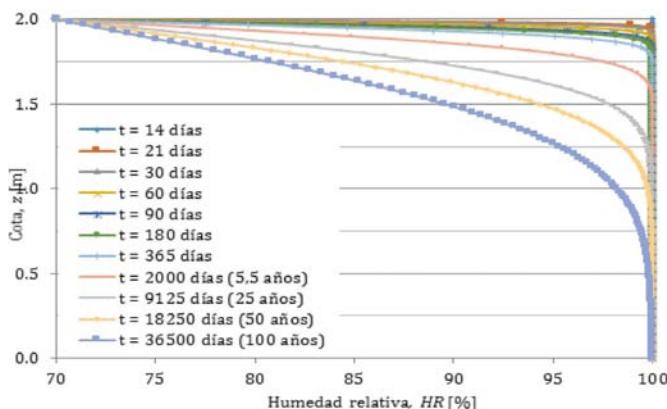
## 218. THE POSSIBILITY AND LIMITATION OF ON-SITE TESTING OF ANCHORS

Luis Miguel Pombo Blanco. Hilti AG. Segment Manager Technical Marketing, BU Anchors. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [LuisMiguel.Pombo@hilti.com](mailto:LuisMiguel.Pombo@hilti.com)

Antonio Cardo Fernández. Hilti Española S.A. Responsable Oficina Técnica. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [Antonio.Cardo@hilti.com](mailto:Antonio.Cardo@hilti.com)

Anchors, on-site testing, quality, resistance.

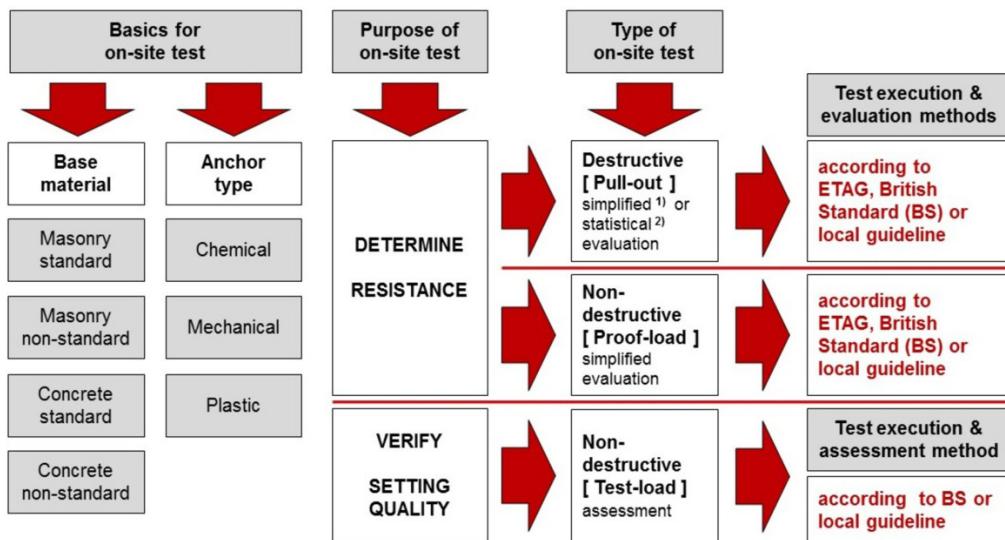
On-site testing is only one but an important part of the inspection of anchoring activities where additional assurance of installation quality is



**Figura 1.** Estimación numérica de la evolución del perfil de humedad relativa con el tiempo



**Figura 2.** Dados de hormigón armado ( $h = 2,0 \text{ m}$ ) bajo condiciones termohigrométricas in situ

*Hilti test execution and evaluation method based on type of on-site test, purpose, base material*

deemed necessary (non-destructive proof loading) or where resistance values for the design are missing due to similar but not identical base material as given in the relevant approval document of a specific anchor type (destructive pull-out test or non-destructive proof load test).

However if a wrong logic on the interpretation of on-site testing results is applied, the result could compromise the stability of the structure, cause risk to human life and/or lead to considerable economic consequences.

## **246. OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS INDUSTRIALES, PARAMETRIZADA CON EL PROGRAMA GEOGEBRA**

### **OPTIMIZATION OF PRECAST CONCRETE STRUCTURES FOR CONSTRUCTION OF INDUSTRIAL BUILDINGS, THROUGH PARAMETRIC ANALYSIS ASSISTED WITH GEOGEBRA**

Alfonso Barba Pérez. Pretersa-Prenavisa Estructuras de Hormigón. Responsable de Proyectos. MSc Ingeniero Civil. Máster en Ingeniero de Estructuras. [abarba@pretersa.com](mailto:abarba@pretersa.com)

Jaime Fernández Gómez. ETSICCP, UPM. Catedrático de Edificación y Prefabricación. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [jaime.fernandez.gomez@upm.es](mailto:jaime.fernandez.gomez@upm.es)

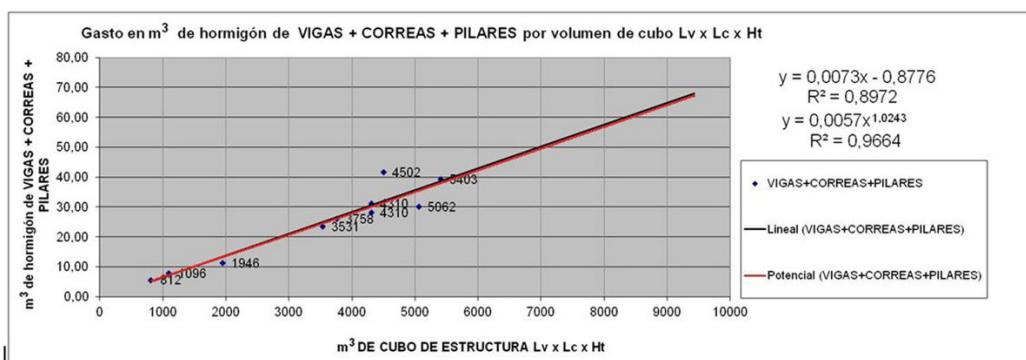
David Usero Mainer. Facultad de Ciencias Químicas, UCM. Profesor del Departamento de Matemática Aplicada. Dr. en Matemáticas. [umdavid@mat.ucm.es](mailto:umdavid@mat.ucm.es)

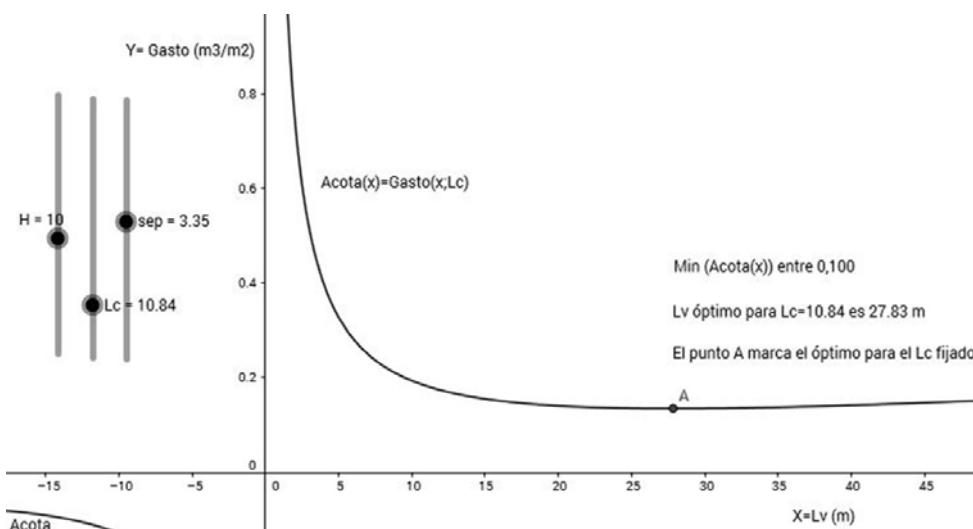
Paula Villanueva Llauradó. ETSICCP, UPM. Investigadora en formación. Arquitecta. Máster en Ingeniero de las Estructuras. [p.v.llaurado@gmail.com](mailto:p.v.llaurado@gmail.com)

Estructuras prefabricadas, edificios industriales, hormigón prefabricado, optimización estructural, GeoGebra.

*Precast structures, industrial buildings, precast concrete, structural optimization, GeoGebra.*

El objeto de la presente investigación es analizar las estructuras prefabricadas de hormigón que intervienen en la composición de edificios industriales, con el fin determinar las variables que permitan optimizar su diseño. Para ello, se han determinado los parámetros más influyentes en el comportamiento de esta tipología estructural, formulados apoyándose en 20 proyectos constructivos de obras ejecutadas; los proyectos fueron seleccionados por presentar algunos aspectos comunes facilitando así su comparación, tales como: misma resistencia característica del hormigón en las distintas obras para cada elemento estructural y similares acciones de viento y sismo. El objetivo es conseguir una guía básica en la fase de predimensionamiento, relacionando

**Figura 1.** Regresión de  $m^3$  de hormigón en estructura por  $m^3$  de estructura construida ( $Lv \times Lc \times Ht$ )



**Figura 2.** Análisis de funciones con el Programa GeoGebra para la obtención de  $Lv$  óptimo ( $H_p = 10,0 \text{ m}$ )

la longitud de viga y longitud de correa óptimas para obtener el menor gasto. El procedimiento que se ha seguido es el análisis estadístico y la obtención de líneas de regresión de todos los casos analizados; dicho análisis relaciona, por una parte, los metros cuadrados de superficie construida y el consumo de hormigón para cada combinación de vigas y correas, y, por otra, el volumen construido y el consumo de hormigón para las estructuras completas, añadiendo además la repercusión de los pilares. Finalmente se ha desarrollado una función teórica, la cual pone en relación los parámetros más importantes de las estructuras de hormigón prefabricado para naves industriales. El análisis se ha complementado con una optimización con el programa GeoGebra (software libre de matemáticas dinámico que permite trabajar con modelos paramétricos), con vistas a servir de aproximación al predimensionamiento de este tipo estructural basándose en el tratamiento masivo de datos; con esta herramienta se han comparado las estructuras de la base de datos más optimizadas de acuerdo a las rectas de regresión y la función teórica, llegando a un buen ajuste de esta última. Se proponen unas dimensiones óptimas de luces de vigas y correas cuya superficie cubierta es un 25% superior a la lograda con las dimensiones clásicas, con lo cual se optimiza el proyecto de las estructuras estudiadas.

mento del trabajo conjunto a través de actuaciones puntuales (proyectos I+D+I) y de la participación continua en Foros en los que se aborden estrategias I+D+i.

Las Plataformas Tecnológicas responden al segundo caso. Son iniciativas promovidas en el año 2004 por los sectores a nivel europeo, a instancias de la CE, que en algunos sectores han sido replicadas a nivel nacional. Este es el caso de la construcción que en el año 2004 lanzó la Plataforma Tecnológica Española de la Construcción PTEC ([www.plataformaptec.es](http://www.plataformaptec.es)).

PTEC promueve la innovación en colaboración entre empresas, centros de investigación y universidades. Por una parte, impulsa la participación en proyectos I+D+i, a nivel nacional (Retos Colaboración, CIEN, etc.) e internacional (H2020, Eureka, Iberoeka, programas bilaterales y unilaterales, etc.).

Por otra parte, PTEC analiza cómo se promueve la innovación en el sector y se detectan barreras que dificultan dicha innovación impulsando estrategias que faciliten su eliminación. En este segundo caso, se trabaja en campos sobre la protección de la propiedad industrial (patentes), la innovación en las PYMES, la innovación en la contratación pública (fig. 1), la evaluación técnica de la innovación y su relación con el seguro y en estrategias para el fomento de la innovación en las empresas (fomento del emprendimiento y el talento innovador, etc.).

## 262. EL FOMENTO DE LA INNOVACIÓN EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

### PROMOTING INNOVATION IN THE CONSTRUCTION SECTOR

Jesús Rodríguez Santiago. Plataforma Tecnológica Española Construcción PTEC. Director Gerente. Dr. Ingeniero de Caminos. [director@plataformaptec.es](mailto:director@plataformaptec.es)  
 Miguel Amérigo Revuelta. OHL Construcción. Jefe de Servicio de I+D e Innovación. Ingeniero de Caminos. [mamerigo@ohl.es](mailto:mamerigo@ohl.es)  
 Carlos Thomás García. Universidad de Cantabria. Profesor Ayudante Doctor. Dr. en Ciencias Físicas. [carlos.thomas@unican.es](mailto:carlos.thomas@unican.es)

Innovación, construcción, evaluación técnica, seguro, patente.

Innovation, construction, technical evaluation, insurance, patent.

Una de las formas de facilitar la transferencia entre el mundo del conocimiento y el de la empresa para promover la innovación es el fo-



**Figura 1.** Conferencia PTEC sobre innovación y contratación pública



**Figura 2.** Conferencia PTEC sobre innovación en procesos de construcción

La evaluación técnica de la innovación es de hecho una de las barreras que más dificulta el traslado de un desarrollo tecnológico al mercado ya que dicha innovación no suele estar amparada por la normativa. Tras la celebración de un Taller sobre este tema, se ha elaborado un documento con recomendaciones sobre procedimientos de evaluación técnica tanto en los casos de la innovación estructurada, en los que ya existen algunos cauces para evaluar nuevos materiales y componentes a través de documentos DIT, etc., como en los de innovación no estructurada para la que no existen procedimientos suficientemente establecidos de evaluación.

Estrategias para fomentar el talento innovador serán necesarias para afrontar el futuro en la construcción que incluirán aspectos como realidad virtual y realidad aumentada, análisis de datos, el internet de las cosas, computación e intercambio de información, modelización virtual para simular procesos, impresión 3D, etc. Algunos de estos aspectos se tratan en conferencias PTEC relacionadas con la innovación en los procesos de construcción (fig. 2).

## 289. ESTRUCTURAS ATACADAS POR CLORUROS. APPLICACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN EL PUENTE DE ACCESO A LA ISLA DE AROUSA

STRUCTURES WITH CHLORIDE ATTACK. APPLICATION OF CATHODIC PROTECTION IN THE BRIDGE TO ILLA DE AROUSA

José Antonio Becerra Mosquera. Neto Ingeniería. Gerente. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [jabecerram@netoingenieria.com](mailto:jabecerram@netoingenieria.com)

*José Manuel Millán Pérez. Galaicontrol. Director Técnico. Licenciado en Química. jmllan@galaicontrol.com  
José Enrique Pardo Landrove. Consell. Infraestructuras. Xunta de Galicia. Jefe Seguridad y Conservación. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. jose.enrique.pardo.landrove@xunta.es  
Diego Carro López. Universidad da Coruña. Profesor Contratado Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. diego.carro@udc.es*

Protección catódica, reparación de estructuras, corrosión, ataque por cloruros.

*Cathodic protection, structure repair, corrosion, chloride attack.*

El puente de este proyecto es la conexión de la isla de Arousa con la Península Ibérica. Se trata de una estructura de hormigón armado puesta en servicio en 1985. Tiene 1.980 m de longitud y su trazado es una circunferencia de radio de 2,5 kilómetros. Consta de 40 vanos, 38 de las cuales de 50 m de luz y otros dos de 40 m de luz. Sólo presentas juntas en los dos extremos de los estribos.

El tablero es una viga cajón unicelular, de 2,3 m de altura, con dos voladizos transversales. El ancho total de la calzada es de 13,00 m, con dos aceras de 1,50 m, dos arcenes de 1,5 metros y dos carriles de 3,5 m.

Se trata de una estructura en un entorno muy agresivo, con presencia de cloruros y ciclos continuos de humedad-sequedad (en función del tiempo y las mareas). Sin embargo, la condición estructural del puente era buena. Sólo se habían detectado algunos problemas de durabilidad, completamente normal teniendo en cuenta el tiempo transcurrido y la agresividad del medio marino portador de iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), que han conducido a la corrosión de la armadura en algunas áreas.

Las patologías tratadas en este proyecto son: daños por corrosión en el tablero y las pilas, grietas de corte y deformación diferencial en el tablero, algunos nidos de grava en pilas y estribos, signos de corrosión en las placas de apoyo, corrosión debido al mal drenaje superficial, deterioro de algunos apoyos de neopreno y deterioro en cajas de conexión de iluminación.

La reparación consistió en cuatro tipos de intervención: la reparación convencional con parches, inhibidores de corrosión, protección catódica con ánodos de sacrificio y de protección catódica con corriente impresa. Por lo tanto, esta reparación combina la protección catódica con los sistemas convencionales de rehabilitación estructural. El objetivo no era simplemente reparar todas las secciones atacadas por la corrosión, sino garantizar la seguridad y calidad de servicio para los próximos años. Cabe destacar que la actuación de protección catódica fue diseñada para prevenir la progresión del ataque por cloruros, retrasándolo lo máximo posible.



Armadura corroída en la parte inferior del tablero cajón





Cathodic protection wiring installation of a pile

Este documento describe la remodelación de la estructura y, además, se presentan los resultados sobre la evolución de las reparaciones. Esto ha sido posible gracias al sistema de monitorización del puente que proporciona datos de la progresión a la corrosión y su efecto en la vida útil.

### 319. CUANTÍAS MÍNIMAS DE REFUERZO PARA DOVELAS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS PARA ANILLOS DE TÚNEL. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

#### MINIMUM REINFORCEMENT IN FIBRE REINFORCED CONCRETE FOR SEGMENTS IN TUNNEL LININGS. EXPERIMENTAL PROGRAM

Nadia Quijano Arteaga. Universidad Politécnica de Cataluña.  
MSc. Ingeniera Civil. nadiaquijsano23@gmail.com  
Eduardo Galeote Moreno. Universidad Politécnica de Cataluña.  
Doctorando. Ingeniero Civil. eduardo.galeote@upc.edu  
Ana Blanco Álvarez. Universidad Politécnica de Cataluña. Investigadora posdoctoral. Dra. Ingeniera de Caminos. ana.blanco@upc.edu  
Luis Manuel Pinillos Lorenzana. Acciona-Ghella Joint Venture. Jefe de Proyectos de Túneles. Dr. Ingeniero de Caminos. luis.pinillos@agjv.no  
Albert de la Fuente Antequera. Universidad Politécnica de Cataluña.  
Profesor Lector. Dr. Ingeniero de Caminos. albert.de.la.fuente@upc.edu

Ensayo a escala real, hormigón reforzado con fibras, resistencia post-rotura, rotura dúctil.

Full-scale test, fibre reinforced concrete, post-cracking strength, ductile failure.

El hormigón reforzado con fibras (HRF) es un material estructural cuyas aplicaciones están creciendo en número tanto en el campo de la ingeniería civil como en el de la edificación. En este sentido, en el campo específico de los túneles con TBM y, en particular, en la ejecución de los anillos de revestimiento, el uso de este material ha demostrado conducir a ventajas de tipo técnico y económico en comparación con la solución tradicional de hormigón armado con barras. Prueba de ello es que más de 50 túneles construidos con TBM han empleado el HRF como material estructural para la fabricación de las dovelas en los últimos 20 años.

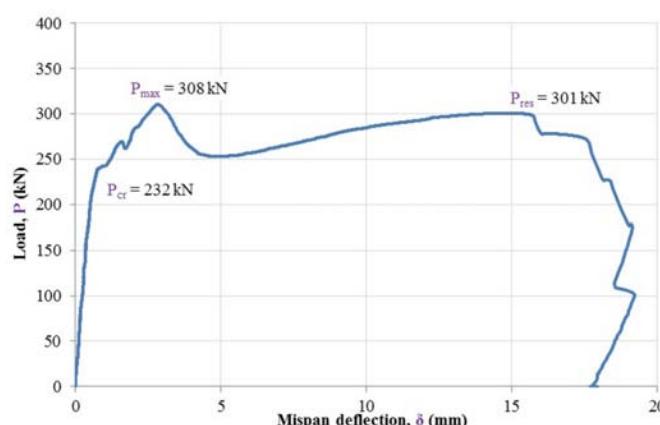
Sin embargo, y pese a las recientes publicaciones de guías de diseño de dovelas de HRF para túneles por parte de la ACI y de la ITA-Tech, el uso del HRF en esta aplicación aún no está suficientemente consolidado. Entre otras razones, la falta de evidencias experimentales del adecuado desempeño del material en ensayos a flexión a escala para distintas configuraciones de refuerzo (fibras o fibras y armadura) parece ser el principal freno. En particular, la capacidad de la dovela para presentar una rotura dúctil en el caso de producirse una eventual fisura en alguna de las fases transitorias (desmoldeo, acopio, transporte y manipulación).

Con el fin de ahondar más en comportamiento mecánico del HRF a nivel de estructura a escala, se ha llevado a cabo una extensa campaña experimental de ensayos de flexión a escala de losas con canto 400 mm y 3.000 mm de longitud, que representarían la geometría de las dovelas de un túnel actualmente en ejecución. Estas losas presentaban diferentes combinaciones de refuerzo de armadura y fibras y fueron ensayadas en una configuración isostática (fig. 1), caracterizando los patrones de fisuración, su grado de ductilidad y respuesta mecánica hasta alcanzar grandes deformaciones (fig. 2). Los resultados mostraron la posibilidad de plantear una sustitución parcial del armado por fibras.

El objetivo de esta comunicación consiste en presentar: (1) el diseño de la campaña experimental de caracterización mecánica tanto del material como de las losas, así como (2) los resultados obtenidos y su análisis desde el punto de vista de los requerimientos estructurales establecidos para dovelas para anillos de túneles.



Figura 1. Configuración de apoyo para el ensayo de flexión a escala real



**Figura 2.** Curva carga. Desplazamiento en el centro del vano para losa de hormigón con refuerzo híbrido

### 397. DISEÑO SÍSMICO DE LA ESTACIÓN MERCADO SANTA ANITA DE LA L2 DEL METRO DE LIMA

#### SEISMIC DESIGN OF THE MERCADO SANTA ANITA STATION IN L2 METRO LIMA PROJECT

Julio Rodríguez Sánchez. AYESA Ingeniería y Arquitectura. Ingeniero Júnior. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [jrsanchez@ayesa.com](mailto:jrsanchez@ayesa.com)  
 Antonio Jesús Díaz Moreno. AYESA Ingeniería y Arquitectura. Jefe de Proyecto y Coordinador de Estructuras. Ingeniero Superior Industrial. [adiazmoreno@ayesa.com](mailto:adiazmoreno@ayesa.com)  
 Guillermo Martínez Ruiz. AYESA Ingeniería y Arquitectura. Jefe de Departamento de Ingeniería del Terreno. Licenciado en Geología. [gmartinez@ayesa.com](mailto:gmartinez@ayesa.com)  
 Ignacio Hinojosa Sánchez-Barbudo. AYESA Ingeniería y Arquitectura. Director de Ingeniería en España. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [ihinojosa@ayesa.com](mailto:ihinojosa@ayesa.com)

Diseño sísmico, terremotos, estructuras enterradas, modelización numérica, interacción suelo-estructura.

*Seismic design, earthquakes, buried structures, numerical modeling, soil-structure interaction.*

Muchas estructuras enterradas son parte fundamental de infraestructuras esenciales para grandes ciudades, como pueden ser las líneas de transporte subterráneo o sistemas de abastecimiento y servicios enterrados. En zonas sísmicas, estas deben soportar terremotos severos sin pérdida de operatividad, ya que son vitales para la población. Los procesos estocásticos que rigen los eventos sísmicos, y el comportamiento dinámico de estructuras enterradas, hacen que el proceso de diseño de estos elementos sea un reto muy complejo que sigue sin estar completamente resuelto.

La L2 del Metro de Lima es el proyecto más ambicioso de infraestructura subterránea de transporte en América Latina y está localizada en una de las zonas sísmicas más activas del mundo. La construcción corre a cargo de CJV (FCC-Dragados-Impregilo-COSAPI), y AYESA Ingeniería y Arquitectura participa como diseñador para las estaciones de línea.

El diseño de las estaciones de la L2 ahonda en las últimas innovaciones en el campo de la Ingeniería Sísmica. Incorpora todos los resultados de recientes investigaciones sobre sismicidad, comportamiento

dinámico de materiales e interacción suelo-estructura. Se elaboraron modelos numéricos dinámicos para efectuar análisis completos tiempo-historia, e incorporar el estado-del-arte sobre diseño sísmico en colaboración con la Universidad de California Berkeley.

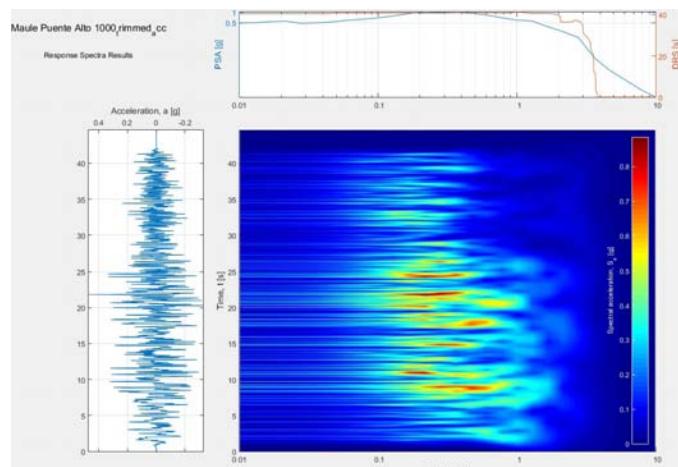
En primer lugar, se emplearon ecuaciones de predicción de movimiento para determinar la solicitud sísmica, definida como espectro de respuesta elástico en superficie. Se eligieron registros sísmicos con similares características sismotectónicas para obtener, mediante un proceso de encaje espectral, acelerogramas ajustados al espectro elegido, y así tener en cuenta la sismicidad local.

Estos acelerogramas fueron tratados mediante un procedimiento de recorte y filtrado para reducir su duración conservando a la vez su espectro de respuesta. Este procedimiento reduce eficazmente el tiempo de computación.

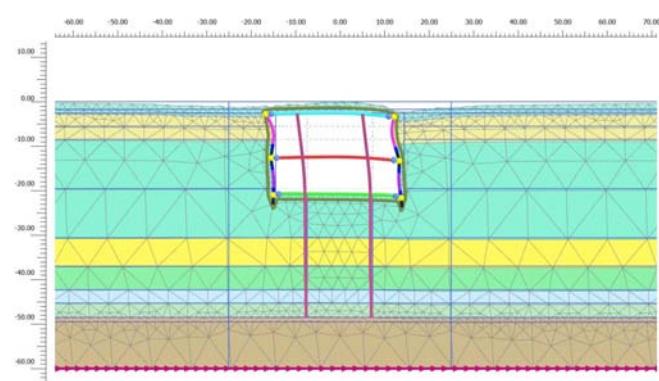
Posteriormente, a partir de numerosos ensayos sísmicos y de laboratorio se calibró, con un modelo constitutivo avanzado de suelos, el modelo geotécnico de comportamiento del terreno, que permite simular de manera precisa la propagación de ondas sísmicas.

El diseño se elaboró basándose en los resultados de los modelos numéricos para que la estación se comportara en rango elástico para un sismo de período de retorno de 1.000 años. Finalmente se comprobó que la estructura es capaz de soportar un sismo de mayor magnitud, para 2.500 años, con daños estructurales reparables.

Mediante la metodología descrita se consiguió un diseño óptimo, fiable, seguro y robusto de los elementos estructurales de las estaciones, con la consiguiente satisfacción de todas las partes integrantes del proyecto.



Espectro de respuesta en tiempo corto del sismo de diseño recortado de 1.000 años



Máxima deformación del modelo numérico para toda la duración sísmica

## 398. CÁLCULO ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS FLEXIBLES. GUÍA DE DISEÑO DE TUBERÍAS DE PRFV

### STRUCTURAL CALCULATION OF FLEXURAL PIPES. THE GRP PIPES DESIGN GUIDELINE

Francisco Ramón Andrés Martín. CEDEX-Centro de Estudios hidrográficos. Director de Programa. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [francisco.r.andres@cedex.es](mailto:francisco.r.andres@cedex.es)  
Ismael Carpintero García. CEDEX-Laboratorio Central. Coordinador de Programa. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [ismael.carpintero@cedex.es](mailto:ismael.carpintero@cedex.es)

Tuberías, PRFV, guía.

Pipes, GRP, guide.

El CEDEX ha coordinado la redacción y publicación de la "Guía técnica para el diseño, fabricación, e instalación de tuberías a presión de poliéster reforzado con fibra de vidrio" elaborada por un grupo de trabajo formado por actores procedentes de los distintos sectores que participan en ámbito de estas conducciones (fabricantes, instaladores, administraciones públicas, laboratorios de control de calidad y universidad), muy utilizadas en la renovación y obra nueva de sistemas de regadío.

En España la normativa de referencia de estas tuberías es la norma UNE-EN 1796, la cual establece el cuerpo básico de especificaciones para esta tipología de conducciones. Sin embargo, es un hecho comprobado que el contenido de esta norma no es lo suficientemente completo (en aspectos relativos a la fabricación de la tubería, a su instalación o a su diseño) como para garantizar por sí mismo una total seguridad en el uso de estas tuberías. Esta Guía técnica pretende satisfacer la necesidad de completar los requerimientos técnicos de dicha normativa para aumentar la seguridad en el uso de las conducciones de PRFV.

En particular, en cuanto a su diseño, la ausencia de una reglamentación específica para el cálculo estructural de este tipo de elementos, habitualmente excluidos de la reglamentación que rige el diseño de estructuras, hace que históricamente hayan convivido distintas normativas con planteamientos de seguridad muy distintos (en buena medida debido a que se trata de un problema estructural esencialmente no lineal por la respuesta del terreno ante la flexión del tubo).

Con idea de consensuar una metodología europea de diseño para estos tubos se constituyó un grupo de trabajo que finalmente publicó la norma CEN/TR 1295-3, la cual plantea dos procedimientos posibles



Colapso de una tubería de PRFV

de cálculo: el primero desarrollado a partir de la alemana ATV-DVWK-A 127; y el segundo de la francesa Fascicule 70.

En España tradicionalmente el diseño estructural de este tipo de conducciones ha sido realizado con los criterios del Manual M45 de la AWWA (American Water Works Association), si bien también se comercializan tuberías diseñadas con la citada ATV-DVWK-A 127, ahora actualizada como primera opción de la CEN/TR 1295-3. La Guía expone la metodología y planteamientos de ambos métodos.

## 400. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL EN PLANTA DE PREFABRICADOS DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE CALIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DE LA MADUREZ

### EXPERIMENTAL VALIDATION IN A PRECAST PLANT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR QUALITY CONTROL, BASED ON CONCRETE MATURITY METHOD

Cristina Vázquez Herrero. Universidade da Coruña. Profesora Titular de Universidad. Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. [cruzquezh@udc.es](mailto:cruzquezh@udc.es)

Gustavo Vázquez Herrero. CIMARQ. Director General. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [gustavo.vazquez@cimarq.es](mailto:gustavo.vazquez@cimarq.es)

Humberto Vázquez Vázquez. CIMARQ. Presidente. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [humberto.vazquez@cimarq.es](mailto:humberto.vazquez@cimarq.es)

Federico Laport Rivas. CIMARQ. Ingeniero. Ingeniero Civil. [federico.laport@cimarq.es](mailto:federico.laport@cimarq.es)

Método de la madurez, ensayos no destructivos, áridos reciclados, demolición, prefabricados.

Concrete maturity method, non-destructive testing, recycled aggregates, demolition, precast.

El proyecto TECNOVAL: Desarrollo de tecnologías para la valorización de RCDs en aplicaciones innovadoras, incluyó la validación experimental en planta de un sistema automatizado para proyectar, monitorizar a través del método de la madurez y otros ensayos no destructivos (ENDs), y prefabricar, elementos prefabricados con hormigones de



Ensayo de flexión



Fabricación y monitorización de las vigas presentadas

áridos reciclados procedentes de la demolición de hormigón de los rechazos en planta. En esta ponencia se describe la metodología, así como los resultados de su aplicación durante la fabricación de vigas pretensadas de dos tipos de hormigón: hormigón convencional (HC), y hormigón con árido reciclado fino y grueso (HR).

Se ha aplicado el novedoso procedimiento armature.es, basado en el método de la madurez, a las vigas prefabricadas de ambos tipos de hormigón, obteniendo que la energía de activación del HR es un 28% superior a la del HC. No se tiene constancia de investigaciones previas en las que se haya aplicado el método de la madurez en hormigones reciclados. Se ha determinado la edad de transferencia de las vigas de HR mediante la metodología armature.es, estimando la resistencia real en un instante determinado a partir de la monitorización de la temperatura interna del hormigón de varias vigas. Dadas las bajas temperaturas ambientales imperantes en la planta de prefabricados durante la fabricación de las vigas pretensadas, típicas de invierno, es preciso esperar un tiempo real de cómo mínimo 5 días, para que se alcance la edad equivalente de 2 días a 20 °C.

La metodología armature.es se ha implementado en una plataforma web para el control de producción de plantas de prefabricados y estructuras, mediante la monitorización remota de las estructuras, aplicando el método de la madurez y otros ensayos no destructivos.



Ensayo de vigas prefabricadas pretensadas

#### 444. HERRAMIENTA DE ANÁLISIS Y CONTROL SÍSMICO PARA EL VIADUCTO DE LA AUTOPISTA URBANA NORTE, CIUDAD DE MÉXICO

##### SHM SYSTEM FOR SEISMIC ANALYSIS AT AUTOPISTA URBANA NORTE (MÉXICO, D.F.)

Mariano Ahijado García. OHL Concesiones. Director de Obras y Mantenimiento Mayor. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [mahijado@ohlconcesiones.com](mailto:mahijado@ohlconcesiones.com)

José Manuel Simón-Talero Muñoz. Torroja Ingeniería S.L.P. CEO. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [jsimontalero@torroja.es](mailto:jsimontalero@torroja.es)  
Alejandro Hernández Gayo. Torroja Ingeniería S.L.P. Ingeniero Proyectista. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. [afernandez@torroja.es](mailto:afernandez@torroja.es)

Manuel Santillán Palencia. Solvver Solution S.L. Director Técnico. Ingeniero de Telecomunicaciones. [manuel.santillan@gmail.com](mailto:manuel.santillan@gmail.com)  
Ignacio de Villar Meca. Solvver Solution S.L. Director. Ingeniero Informático. [ignacio.devillar@solvver.com](mailto:ignacio.devillar@solvver.com)

Instrumentación, SHM, detección de daños, evento sísmico, tiempo-real.

Instrumentation, structural health monitoring SHM, damage detection, seismic event, real-time response.

En las últimas décadas, muchas ciudades han desarrollado grandes infraestructuras de transporte para dar respuesta a los incrementos de tráfico. La construcción de grandes viaductos dentro de las ciudades es una de las soluciones más comúnmente utilizadas. El comportamiento real de estas largas estructuras en caso de sismo es poco conocido. Una evaluación rápida y precisa de su estado tras un terremoto sería muy útil para confirmar su respuesta frente a sismo. Esta información puede ser especialmente ventajosa en estructuras que forman parte de redes de peaje, donde podría tomarse rápidamente y con seguridad la decisión de seguir operando o no, tras un evento sísmico.

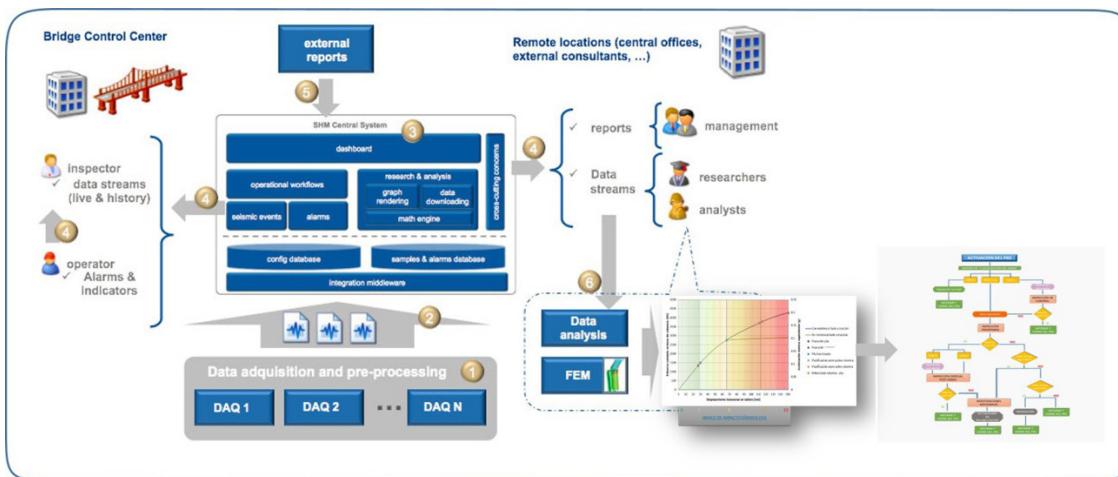
La metodología propuesta se basa en el empleo de Sistemas de Monitorización Estructural, combinado con el desarrollo y análisis de Modelos teóricos estructurales de Elementos Finitos de la estructura.

La red de sensores instalados (principalmente acelerómetros) proporciona, tras el adecuado post-proceso, información en remoto y tiempo real sobre el comportamiento estático y dinámico de la estructura, fácilmente accesible a través del software desarrollado a tal efecto. Se genera información por tanto antes, durante y después de la ocurrencia de un evento sísmico. Modelos teóricos de elementos finitos son generados y calibrados a partir de los datos iniciales obtenidos por el Sistema de Monitorización, para no sólo predecir el comportamiento futuro de esas estructuras ante más eventos sísmicos, también para determinar y ajustar los umbrales y alarmas del sistema.

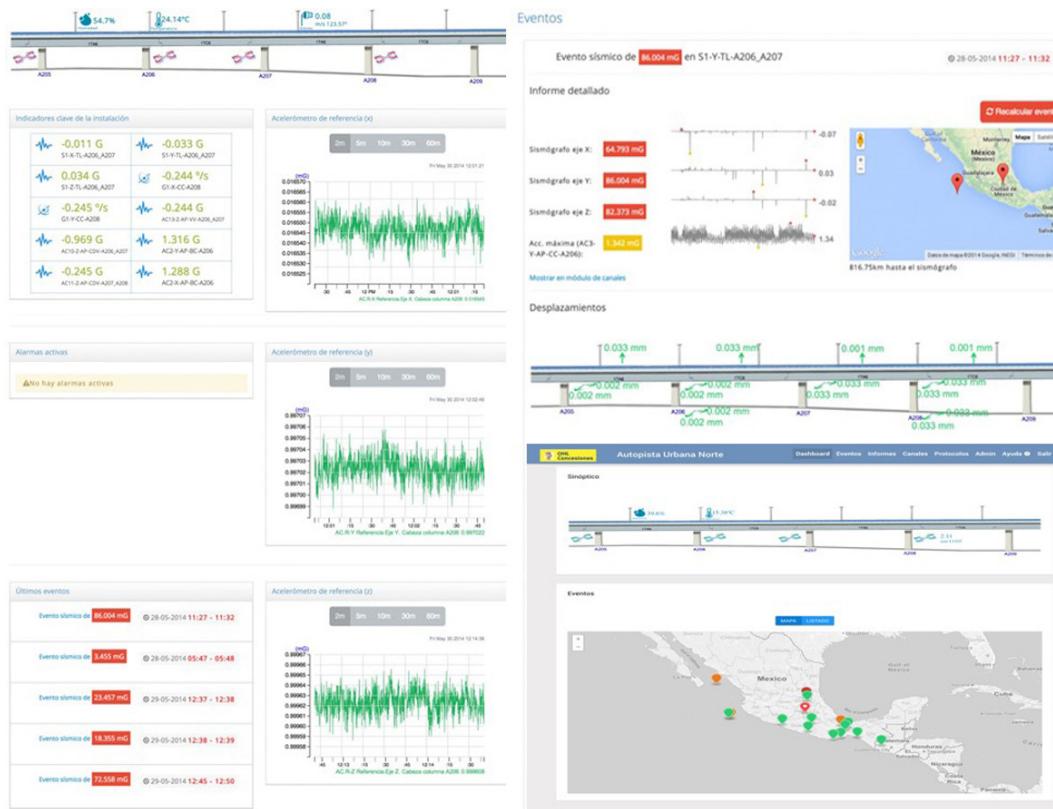
El software del Sistema de Monitorización analiza si cada valor de aceleración o desplazamientos obtenidos está dentro de los límites de los umbrales definidos, comprobando por tanto que la estructura está en buenas condiciones para seguir operando. En caso contrario, se generará una alarma, se reportará dicha incidencia y se activará un determinado protocolo de actuación para comprobar el alcance de los daños producidos.

Esta metodología se ha implementado por Torroja Ingeniería S.L.P. en el Viaducto de Autopista Urbana Norte (OHL México), una autopista de peaje elevada (hasta 15 km en Viaducto) en Ciudad de México, donde existe gran ocurrencia de episodios sísmicos.

Se ha desarrollado un software a medida para OHL Concesiones con funcionalidades específicas como detección automática y notificación de eventos sísmicos, evaluación de daños estructurales, planes de respuesta específicos según el nivel de importancia del sismo y protocolos de actuación integrados, además de almacenar toda la información relevante de los episodios sísmicos más importantes.



Arquitectura general del sistema de monitorización, análisis y control sísmico



Software de control y análisis sísmico

## 523. DAMAGE DETECTION THROUGH CONTINUOUS MONITORING OF THE RESPONSE OF A CABLE STAYED BRIDGE TO TEMPERATURE VARIATIONS

Emanuel Tomé. University of Porto, Faculty of Engineering.  
PhD student. emanuel.tome@fe.up.pt  
Mário Pimentel. University of Porto, Faculty of Engineering. Assistant Professor. mjsp@fe.up.pt  
Joaquim Figueiras. University of Porto, Faculty of Engineering. Full Professor. jafig@fe.up.pt

Structural health-monitoring, cable stayed bridges, damage detection.

One of the current challenges in the context of structural health monitoring (SHM) of important infrastructures, such as large span bridges, is how to manage the large amount of data produced by the SHM systems and make it readily available to the bridge management authorities in the form of performance indicators. In this study, the possi-

bilities of early detection of structural damage through the analysis of the measured structural response of a cable-stayed bridge to daily and seasonal temperature variations are evaluated. A continuous monitoring system has been installed in the Corgo Bridge, here selected as case-study, which is acquiring data without significant interruptions for more than half year. The monitoring systems is described, and the software being used to access remotely and in real-time the measured data is presented.

The ability of detecting damage using the structural response to thermal loads is evaluated applying Multilinear Regression Analysis (MLR) and Principal Component Analysis (PCA) for removing the environmental effects of the structural response. At this stage, simulated datasets were adopted so that at least one year of data can be used in order to remove the environmental effects from the structural response of the bridge in the undamaged state. The simulations were carefully performed by generating realistic thermal fields in the cross-sections of the bridge using a finite element thermal analysis in which the boundary conditions are defined using the measured wind velocity, radiation, ambient temperature and air temperature inside the box-girder. The comparisons with the measurements of the existing temperature sensors (of which more than one year of data is available) reveal that a good agreement could be achieved. The thermal action is then applied to a mechanical finite element model of the bridge to obtain the simulated structural behaviour. Again, the comparison with the available measured data reveals a reasonable agreement, indicating that the simulated datasets are representative of the real structural behaviour.

Several damage scenarios are simulated, mainly involving stiffness losses of the stay-cables and it is shown that the adopted methodology, jointly with the installed monitoring system, is able to provide early detection of small damages.

## 552. ENSAYOS SECCIONALES EN TÚNEL DE VIENTO PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO AEROELÁSTICO DE PUENTES

### SECTIONAL TESTS IN WIND TUNNEL FOR THE STUDY OF BRIDGE AEROELASTIC BEHAVIOR

*José Ángel Jurado Albaracín. Universidad da Coruña. Profesor Titular.  
Dr. Ingeniero Industrial. jjurado@udc.es  
Santiago Hernández Ibáñez. Universidad da Coruña. Catedrático.  
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. hernandez@udc.es  
Félix Nieto Mouronte. Universidad da Coruña. Profesor Titular.  
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. fnieto@udc.es  
Arturo Norberto Fontán Pérez. Universidad da Coruña. Profesor Contratado Doctor. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.  
afontan@udc.es*

Puentes, túnel de viento, aeroelasticidad, flameo, excitación por torbellinos.

Bridges, wind tunnel, aeroelasticity, flutter, vortex induce vibration.

Los fenómenos aeroelásticos causados por el viento son determinantes en proyectos de grandes puentes y estructuras esbeltas. El flameo es una condición crítica que puede evaluarse computacionalmente, identificando 18 funciones, que relacionan las fuerzas de viento con los movimientos. Estas funciones denominadas de flameo pueden obtenerse mediante ensayos experimentales de modelos seccionales de tableros en un túnel de viento considerando vibración libre con 3 GDL. Pueden usarse diferentes métodos de identificación, como el



Sistema de muelles soporte de un modelo seccional de tablero

Ibrahim en el dominio del tiempo (MITD), o mínimos cuadrados iterativos (ILS). El análisis computacional del flameo es multimodal y resuelve un problema no lineal de valores propios. La condición de flameo corresponde a la más baja velocidad de viento que da una respuesta con amortiguamiento nulo. Un modelo estructural tridimensional de elementos finitos del puente es imprescindible para obtener sus frecuencias y modos naturales.

Por otro lado, la excitación por torbellinos ocurre frecuentemente en puentes de cables. Incluso otros tipos de puentes de vigas o arcos sufren este fenómeno durante o después de su construcción. Es bien sabido que un cuerpo no aerodinámico genera vórtices alternativos a una frecuencia que depende del número de Reynolds y de su geometría. Estos vórtices producen fuerzas alternantes sobre el cuerpo a dicha frecuencia. En muchos casos de estructuras flexibles de bajo amortiguamiento estas fuerzas producen vibraciones inaceptables. Las amplitudes más grandes ocurren cuando la frecuencia de los vórtices es parecida a alguna frecuencia natural de la estructura. El efecto de lock-in tiene lugar y la frecuencia de los vórtices deja de cambiar con la velocidad en un rango significativo.

Este artículo explica ambos fenómenos, flameo y excitación por torbellinos. También describe los ensayos de modelos seccionales que se llevan a cabo en el túnel de viento de la ETSI de Caminos Canales y Puertos de la Universidad da Coruña usando los códigos propios PC-TUVI y FLAS. El artículo muestra algunos ejemplos como el proyecto del puente de Messina, el puente atirantado de Talavera con tablero de hormigón, o la pasarela peatonal de banda tesa de Cuenca con un esbelto tablero de hormigón sobre cables de fibra de carbono.



Modelo seccional de la pasarela de Cuenca