

La Ingeniería
de Caminos
hacia
el Siglo XXI



Expo

El Ingeniero
de Caminos
en el S.XXI

3ª Edición
SICMA



Semana
de la Ingeniería
de Caminos
en Madrid
2015

EDICIÓN. MARZO 2015

NIPO: 161-15-020-7

Índice

- 05 **Presentación**
Miguel Ángel Carrillo Suárez
Decano de la Demarcación de Madrid del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
- 09 **El papel del Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en el siglo XXI**
Jose A. Martín-Caro
*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
INES Ingenieros Consultores*
- 15 **Bits y átomos, o materia, energía e inteligencia**
César Lanza
*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Tecnova*
- 25 **Ingeniería y Naturaleza: Una vía de doble sentido**
Manuel Elices
*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Ciencia de Materiales*
Gustavo Guinea
*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Ciencia de Materiales*
- 41 **Investigación en nuevos materiales e innovación en los existentes**
Ignacio Calvo
*Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
Innovación Tecnológica de ACCIONA Infraestructuras*
María Pilar Górriz
*Dra. Ciencias Químicas
Innovación Tecnológica de ACCIONA Infraestructuras*
- 48 **Vida de una infraestructura**
Gonzalo Arias Hofman
*Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
INES Ingenieros Consultores*
- 56 **Otras áreas de actividad**
Mariano Navas
*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CEDEX-Ministerio de Fomento*
- 64 **El sistema de transporte público de la Comunidad de Madrid: un modelo exportable**
Dionisio González
*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
CONSORCIO REGIONAL DE TRANSPORTES DE MADRID*
- 73 **Créditos**

Presentación

La tercera edición de la Semana de la Ingeniería de Caminos en Madrid, organizada por la Demarcación de Madrid del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, ha ampliado el tradicional programa de actividades divulgativas, conferencias, jornadas temáticas, visitas y área expositiva, con actos dedicados a los jóvenes y a los niños con el fin de dar a conocer a toda la sociedad madrileña la actividad profesional de la ingeniería de caminos.

La exposición sigue siendo el eje central de esta tercera edición. Bajo el título **La ingeniería de Caminos hacia el siglo XXI** se recogen realmente dos muestras expositivas “Lucio del Valle (1815-1874). Ingeniería y fotografía. La Ingeniería de Caminos en el Siglo XIX”, y “El Ingeniero de Caminos en el Siglo XXI”. De esta manera conseguimos tener una visión de la evolución de esta profesión al plasmarse formas diferentes de su actividad, lo que se desarrollaba hace dos siglos y lo que se hace en la actualidad y sobre todo en un futuro inmediato.

Este catálogo se dedica a la exposición en la que se muestra a la sociedad, de una manera didáctica, clara y amena, nuestra actividad profesional en el siglo XXI. Además de la edición impresa se ha realizado una versión digital que va a permitir facilitar la difusión del mismo.

Quiero agradecer a todas las entidades que han colaborado en la exposición y que se relacionan al final del catálogo. Especialmente al Comisario de la exposición, José Antonio Martín-Caro, que ha conseguido plasmar, tras innumerables horas de dedicación y esfuerzo y de una manera rigurosa pero agradable e ilustrativa para el visitante, una visión actual y de próximo futuro de lo que es y será nuestra actividad profesional.

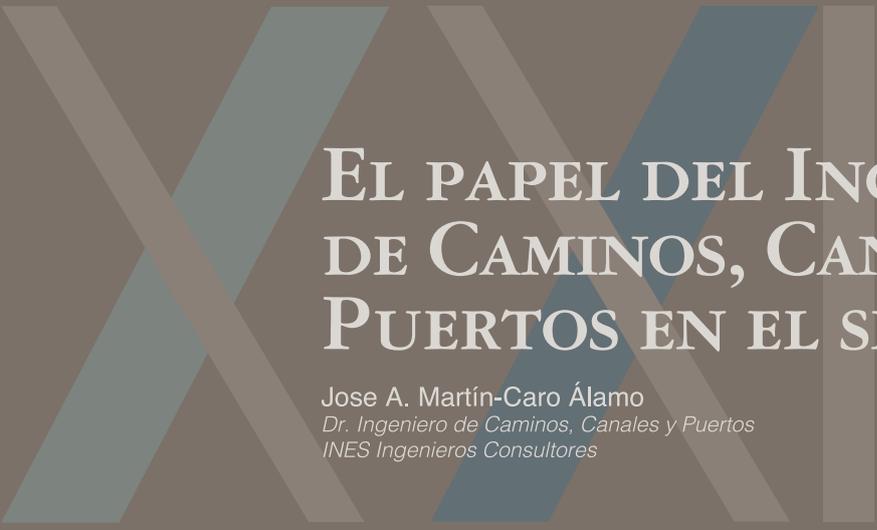
Muchas gracias.

Miguel Ángel Carrillo Suárez
*Decano de la Demarcación de Madrid del Colegio
de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*

A large, stylized graphic of the Roman numeral 'XXI' is positioned behind the title. The 'X's are formed by overlapping diagonal bars in shades of grey and blue, while the 'I' is a solid vertical bar in grey.

LA INGENIERÍA DE CAMINOS EN EL SIGLO XXI





EL PAPEL DEL INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS EN EL SIGLO XXI

Jose A. Martín-Caro Álamo
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
INES Ingenieros Consultores

Desde hace unos años la Demarcación de Madrid del Colegio de Caminos, Canales y Puertos, con buen criterio, organiza una Exposición dentro de la Semana de la Ingeniería que pretende mostrar nuestra cara más real y actual al resto de ciudadanos. Es esta una tarea no demasiado fácil ya que al pertenecer nuestra profesión a un sector muy consolidado, nuestros conciudadanos tienden muchas veces a vernos como una profesión inmóvil, poco propensa a cambios y quizás con una imagen no demasiado moderna.

Realmente nuestra profesión ha cambiado mucho en los últimos años, no sólo porque hoy en día nos dedicamos a quehaceres muy diferentes a los de hace unos años (y esta tendencia va a acentuarse en el futuro), sino porque incluso en las áreas donde el Ingeniero de Caminos siempre ha participado de manera fundamental, preservando la naturaleza y generando, operando y manteniendo las grandes infraestructuras de un país, nuestra manera de trabajar ha cambiado de una manera definitiva.

Esta conversión de la profesión (a médicos, arquitectos, abogados y otras profesiones liberales también les tocó hace unos años) se ha debido a factores de diversa índole, unos más generales y comunes con otras profesiones y otros más específicos y particulares de la nuestra. Sin querer entrar a enumerarlos, y menos aún a valorarlos, es importante ser conscientes de que este nuevo panorama en el que nos encontramos no parece que se vaya a revertir.

El brusco cambio ocurrido en el sector de la construcción en nuestro país, la aparición de nuevos horizontes donde proyectar y construir más allá de nuestras fronteras, la irrupción con fuerza de las nuevas tecnologías, la necesidad de conservar lo ya construido y un largo etcétera de nuevos condicionantes están cambiando el panorama de actuación del ingeniero. El Ingeniero de Caminos por tanto, ocupado y preocupado durante los últimos 25 años en la parte más nuclear de la profesión, la construcción de grandes infraestructuras, debe adaptarse a las nuevas condiciones de contorno para hacer frente a las nuevas necesidades que la sociedad le requiere.

Por todo esto, se ha juzgado interesante en esta Exposición, cuyo título “el ingeniero de Caminos en el s. XXI” que tengo el honor de comisariar, analizar cuáles son los retos a los que el Ingeniero de Caminos se va a enfrentar, mejor dicho, se está ya enfrentando en el siglo XXI, mostrando a la población en general y a los futuros ingenieros en particular, hacia donde puede orientarse nuestra profesión en el futuro próximo.

Sin pretender otra cosa que presentar algunos de los aspectos vitales que van a condicionar el quehacer del ingeniero en los próximos años, se han desarrollado en la Exposición cinco aspectos reveladores de este papel.

No se ha buscado un hilo conductor único entre ellos, tan sólo se han escogido cinco de los muchos que existen, fundamentalmente por motivos de espacio, que creo representan mejor cómo la profesión se está redireccionando y modificando, teniendo muy en cuenta nuestra vocación y formación.

Las Nuevas Tecnologías y la profesión

En primer lugar, es obligado reconocer el enorme cambio que ha supuesto la adopción de manera definitiva de las nuevas tecnologías en la práctica del ingeniero, en cuanto a la gestación de un nuevo modelo de trabajo, permitiendo la deslocalización del ingeniero y su *virtual ubicuidad*. Cualquiera que tenga más de

40 años y haya trabajado en la era pre internet/digital tiene muy presente el brusco cambio ocurrido en la manera de comunicarnos y en la manera de trabajar.

Por otra parte, la posibilidad de tener acceso a una gran cantidad de información en tiempo real está facilitando, desde el proyecto y construcción de realidades más fiables, globales y controladas, la posibilidad de analizar y llevar a cabo estudios predictivos de posibles desastres naturales.

Un aspecto que nos está afectando a todos pero no por ello se debe dejar de mencionar, es la implantación de las nuevas tecnologías, especialmente las de la información y comunicación (TICs) que están cambiando el modelo formativo y educativo de la profesión.

La aplicación de las nuevas tecnologías está permitiendo generar y desarrollar sistemas de decisión semiautomáticos que se retroalimentan de la red y que han posibilitado una gestión más eficiente de los recursos. En este sentido, la gestión de ciertos servicios y de la energía son ejemplos muy representativos de la "inteligencia en red".

Por último, un aspecto que en mi opinión debería ser cuestión de debate en la profesión es si deberíamos de fomentar el papel del ingeniero como desarrollador de nuevas tecnologías en lugar de como mero usuario. Es indudable que el Ingeniero ha incorporado de una manera clara el uso de las nuevas tecnologías en su práctica diaria y que, además, desempeña un papel principal como desarrollador de tecnologías más clásicas, más relacionadas con la construcción y la industria, pero quizás nuestro papel como desarrolladores de TICs no es suficiente.

Nuevos materiales e innovación en los existentes

La aparición de nuevos materiales y la innovación en los existentes además de cambiar la manera de concebir y construir las nuevas infraestructuras (haciéndolas más sostenibles y amables con el medioambiente), está ampliando el campo de actuación y trabajo habitual de los ingenieros de caminos. El estudio e innovación en materiales y estructuras no solo se debe aplicar a las obras civiles sino también a otros ámbitos como la bio-mecánica. Estos ámbitos todavía periféricos de la profesión seguramente requerirán en un futuro próximo de la participación en mayor medida del Ingeniero de Caminos.

Por otra parte, y tal y como refiere otro de los ponentes de esta publicación "los avances en el conocimiento de la estructura y función de muchos seres vivos permite no solo imitar o copiar a la Naturaleza sino optimizar algunas funciones que la evolución todavía no ha logrado, o diseñar nuevas y más eficaces estructuras".

Finalmente, toda esta investigación realizada y desarrollada en este campo y en otros, está posibilitando una innovación y regeneración general de la profesión, arrastrando y rejuveneciendo a los ingenieros de caminos. O al menos deberíamos hacer lo posible para que así fuera.

Vida de las infraestructuras

Poder entender y concebir las infraestructuras como elementos vivos y no inertes, reconocer y analizar las diferentes etapas vitales por las que pasan se antoja como una tarea indispensable en el nuevo panorama que se cierne en nuestro país, donde el parque de infraestructuras es muy importante y empieza a tener una edad avanzada.

España, ha resuelto su histórica carencia de infraestructuras en 25 años de “euforia constructiva” colocándonos a la cabeza de Europa y casi del mundo por nuestra calidad y cantidad de infraestructuras. Ahora nos encontramos en la transición a un modelo más europeo y sostenible de mantener lo construido. Para ello es imprescindible entender el pasado para respetar lo existente y aprovechar mejor las infraestructuras construidas para la gestión eficiente de nuestros activos.

Infraestructuras eficientes y polivalentes, correctamente construidas y mantenidas bajo criterios técnicos y económicos es un paradigma que debe constituir una realidad en un futuro muy próximo.

Otras áreas de actuación

Es importante también que el Ingeniero de Caminos, por su vocación y formación, camine hacia la diversificación de dos formas.

Por una parte, volviendo a un gran número de áreas de trabajo en las que históricamente el Ingeniero de Caminos ha tenido mucha presencia: la política, sociedad, el sector de la energía, el patrimonio histórico, el financiero, etc. y que debido a su dedicación casi exclusiva al proyecto y construcción de obras civiles en este último periodo vertebrador del país había descuidado.

Por otra parte, en los últimos años han surgido nuevos ámbitos donde el Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos debe incorporarse, como son la consultoría técnico-financiera, nuevos materiales, redes tecnológicas, etc., integrándose en equipos pluridisciplinarios y trabajando en organizaciones cada vez más amplias y deslocalizadas.

12

Compartir nuestra experiencia

Por último, es fundamental resaltar que la “gimnasia constructiva” realizada en España en los últimos 25 años, no solo ha servido para vertebrar al país, sino que ha posibilitado la generación de un *know-how* técnico que ahora se está compartiendo con muchos países que están pasando por el pulso constructivo por el que pasó España hace pocos años.

Si bien es verdad que la construcción es un sector difícilmente exportable tal cual, el producto que se está exportando es mucho más complejo, incluyendo desde la detección de la necesidad, la planificación de la infraestructura, el proyecto y la construcción, la operación de la misma y su mantenimiento.

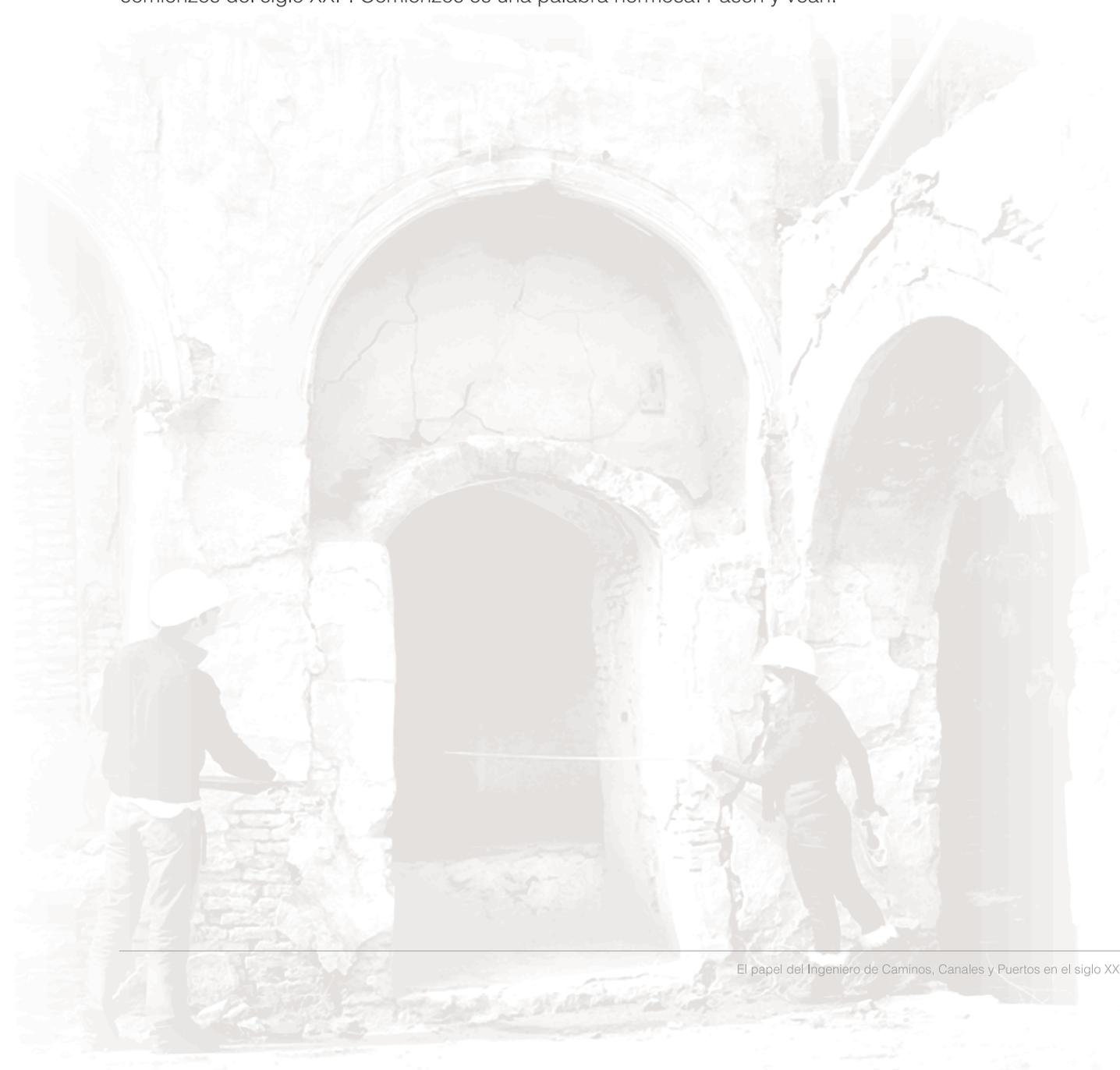
Baste señalar cómo la ejemplar planificación y gestión de las infraestructuras del transporte público (Consorcio de Transportes de la Comunidad de Madrid) y de la gestión del agua (Canal de Isabel II), donde Madrid es una ciudad pionera y puntera, está posibilitando la exportación de ambos modelos a infinidad de rincones del mundo.

No quisiera terminar sin mostrar mi agradecimiento sincero a todas las entidades que han participado con entusiasmo en la Exposición y especialmente a todas las personas, que han sido muchas, que con su ayuda la han hecho posible, y que a riesgo de dejarme a alguien sin citar, al que ruego me sepa perdonar, cito a continuación: Jose Luis Martínez, Antonio Martínez Cutillas, Luis Miguel Viartola, Pedro Cavero, Javier Martínez, Julio González Tojo, Alfonso Martínez Caminero, Javier Otamendi, Laura Delgado e Illán Paniagua.

Sí quiero mencionar explícitamente a los coautores de este catálogo: César Lanza, Gustavo Guinea, Ignacio Calvo, Pilar Górriz, Gonzalo Arias Hofman, Mariano Navas y Dionisio González, responsables de que las ideas de la Exposición queden por escrito. Por último, también es obligado agradecer el gran trabajo realizado por Paco Siles y a todo su equipo.

Thomas Piketty, en su reciente éxito editorial "El capital en el siglo XXI", se disculpa ante el lector por el atrevimiento del título de su libro. Parfraseándole diremos; ¿se imaginan a unos ingenieros de caminos de 1915 tratando de anticipar como sería la evolución de la profesión a lo largo del siglo XX?, por tanto, no puedo hacer otra cosa que disculparme también por mi atrevimiento.

Es cierto, la exposición debería llamarse "El Papel del Ingeniero de Caminos a comienzos del siglo XXI". Comienzos es una palabra hermosa. Pasen y vean.







BITS Y ÁTOMOS, O MATERIA, ENERGÍA E INTELIGENCIA

César Lanza
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Tecnova

Los cuatro elementos de los presocráticos, Tierra, Agua, Aire y Fuego, rigieron junto con el Éter aristotélico la concepción material del mundo del hombre antiguo hasta la Edad Media. La Ciencia, como sabemos, operó a partir del Renacimiento un cambio paradigmático sobre el modelo de los estados de la materia, estableciendo un camino para el pensamiento humano que ya sobrepasa el sistema atómico instaurado por Rutherford a comienzos del siglo XX para avanzar más lejos y más profundamente en el estado del arte del modelo estándar de la física de partículas. Hoy día, la comprensión humana del mundo material se establece en torno a tres categorías conceptuales que son las partículas de materia (leptones y quarks), las partículas mediadoras de fuerzas o bosones y finalmente el recién llegado (predicho no obstante tiempo atrás) bosón de Higgs, cuya existencia fue confirmada por el CERN en el año 2012. Las interacciones físicas espacio-temporales, los intercambios de materia y energía, poseen así un modelo de referencia que parece sólido aunque no se puede declarar completo, pues a medida que el conocimiento humano evoluciona, así lo hacen las representaciones que hace el hombre sobre sí mismo y todo lo que le rodea. En ese sentido, las ciencias físicas pueden darse por satisfechas habida cuenta de su capacidad demostrada para articular un sistema de conocimientos que, siguiendo a Popper en su conocida obra *La lógica de la investigación científica*¹, afronta una cuestión central de la epistemología: «Creo, sin embargo, que al menos existe un problema filosófico por el que se interesan todos los hombres que reflexionan: es el de la cosmología, el problema de entender el mundo, incluidos nosotros y nuestro conocimiento como parte de él.»

Pero el mundo de hoy es en buena parte artificial y no obra de la Naturaleza, está constituido por flujos, equilibrios y relaciones que no sólo involucran materia y energía sino un elemento característico de nuestra especie: la información, en gran medida producida, transferida y utilizada por los seres humanos. El mundo y más concretamente la sociedad, el complejo ente colectivo que constituyen en su conjunto los hombres y sus relaciones, ha de comprenderse en términos de materia, energía e información. De ahí el título de estas notas: *Bits y átomos, o materia, energía e inteligencia*. La relevancia de la información en el curso evolutivo de la sociedad es un hecho firmemente asentado en la tercera de las revoluciones científico-tecnológicas, que es precisamente la que señalan los impresionantes avances establecidos tras la Segunda Guerra Mundial en las fronteras del conocimiento que el hombre ha ido conquistando en estas últimas décadas: las ciencias de la computación, la física de semiconductores, la tecnología electrónica, la arquitectura de computadores, la teoría de la comunicación y los impresionantes desarrollos técnicos subsecuentes que conocemos con el término genérico de tecnologías de la información y de las comunicaciones. La sociedad, de la manera que hoy es, se debe posiblemente tanto a Von Neumann como a Newton y a Turing como a Lavoisier.

El ya denso entramado científico-tecnológico, industrial, económico y sociológico que constituye el ámbito de las tecnologías de la información y las comunicaciones afecta de manera irrevocable a la práctica totalidad de las actividades humanas, y cómo no, a las profesiones que unos y otros ejercemos. Esto es quizá más evidente en el dominio de la técnica, es decir el conjunto de las ramas de la ingeniería, y desde luego afecta de manera profunda y además con un largo recorrido por venir a las especialidades de los ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Esta profesión nuestra, más que bicentenaria y en buena medida orientada a la concepción, construcción y operación de los grandes sistemas civiles (me niego a escribir 'infraestructuras', feísima palabra y degradador signifiicante), constituye por riqueza de contenido, grandeza de escala e impacto público uno de los ámbitos de aplicación más proclives y prometedores del complejo tecno-científico digital que conforman la inmaterialidad de las TIC y sus infinitas aplicaciones. Intentaré expo-

ner en estas notas, de manera muy parcial y sin duda incompleta pero espero que al menos representativa, algunos hechos e ideas acerca de la importancia que ya posee, y aún más en el futuro, lo digital en un ámbito profesional hasta hace poco dominado casi exclusivamente por fuerzas y energías. Para ello elegiré dos ejemplos muy concretos: en primer lugar, (i) las técnicas de modelización y simulación informática, cuya influencia lleva ya años siendo patente en todo lo que se refiere a la concepción (diseño, cálculo y proyecto) de las cosas que hacemos los ingenieros; y por otra parte, (ii) el impacto que supone el despliegue de la «inteligencia» digital embebida en la pluralidad de artefactos que opera la ingeniería, en este caso en particular en el ámbito de la energía eléctrica. La información, capturada, procesada y difundida en tiempo real a través de las redes inteligentes constituye un factor clave en la transformación de las actividades y negocios del sector, fenómeno de gran calado que se conoce como «transición energética» y posee dos *drivers* necesariamente complementarios: la descarbonización en la actividad de generación y la inteligencia en las redes de transporte y distribución de electricidad.

La computación en ingeniería: del MEF a los nuevos paradigmas de diseño

En un ilustrativo artículo² publicado hace ya diez años, en 2005, escribía Enrique Alarcón, catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid, que el incremento de la potencia de cálculo ha permitido no sólo un desarrollo explosivo de los métodos computacionales, sino también la exploración de nuevas ideas en ingeniería, especialmente en cuestiones relacionadas con la seguridad, las acciones, la monitorización o el control activo de las estructuras. Es bien cierto que en este caso se hacen patentes los efectos positivos del desarrollo tecnológico sobre la propia Ciencia, que algunos creen unida a lo anterior por una relación unívoca e inexorable de precedencia madre-hijo cuando más bien se trata de una causalidad circular tipo *chicken-egg*. Los avances en el campo de las tecnologías de la información -que ya parecen un hecho corriente en la sociedad post-industrial de la información y del conocimiento- producen debido a su transversalidad un efecto que en el mundo anglosajón se conoce como *cross-pollination*, o fertilización cruzada. Este hecho sucede cuando los logros de un determinado campo o disciplina se trasladan o exportan a otros dominios, dando lugar a impulsos significativos, incluso saltos cuánticos, del estado del arte del conocimiento científico-técnico. Algo así sucedió con la irrupción de los computadores en determinadas especialidades de la ingeniería, singularmente en la mecánica del continuo, sus áreas de conocimiento y ámbitos de aplicación, especialmente el análisis estructural. La innovación en este caso es tan rica en frutos, que en palabras del propio Alarcón: «... ello abre un panorama de alcance insospechado que está conduciendo a evoluciones conceptuales como el cambio a proyectos basados en prestaciones, que está revolucionando tanto los diseños como las normas de buena práctica, o los sistemas de seguimiento del comportamiento de la estructura a lo largo de su vida».

El papel hoy día crucial del computador en la ingeniería inició su afirmación alterando profundamente uno de los actos más característicos de aquélla, el cálculo, y de ahí parte su extensión continua y sin pausa previsible a procesos de más alto nivel que llegan hasta el diseño y la propia conceptualización, como se verá más adelante. Casi todos los historiadores y cronistas de la historia de la técnica señalan un punto de inflexión en la evolución disciplinar de la ciencia estructural que se sitúa en la década de los Cincuenta. Así Timoshenko, uno de los sabios más renombrados en este campo, cierra precisamente en esos años su cronología del recorrido teórico de la disciplina³, fuertemente concentrado en los desarrollos físico-matemáticos del período 1800-1950 y en la comprensión de los procesos

2. *Los avances experimentados en el marco de la investigación en la modelización y el análisis del comportamiento de sistemas constructivos*, Enrique Alarcón. Publicado en *Informes de la Construcción*, Vol. 57, nº 499-500 (2005).

3. *History of Strength of Materials*, Stephen P. Timoshenko (Dover, 1983).

4. El brillante ensayo de Argyris que lleva ese mismo título se publicó en la revista *Journal of the Royal Aeronautical Society*, vol. 65 (1965).
5. Este mismo concepto también resulta controvertido y en ocasiones negado desde la propia comunidad científica, cuando considera –erróneamente– que la ingeniería es básicamente ciencia aplicada sin capacidad de generar descubrimientos propios. Véase por ejemplo *El canon científico*, de José Manuel Sánchez Ron (Editorial Crítica, 2005).
6. *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, K.J. Bathe y E.L. Wilson (Prentice-Hall, 1976).

elasto-plásticos fundamentales, cediendo el paso un poco más tarde a la conocida proclama profética de John Argyris, uno de los creadores del método de los elementos finitos: «... *the computer shapes the theory*»⁴. A partir de ese momento ya se intuyó explícitamente dentro de la ingeniería la existencia de una nueva vía de avance del conocimiento científico en la materia, superpuesta a las clásicas de teoría y experimentación, que es la de la simulación informática y los métodos computacionales.

Las consideraciones anteriores reflejan, más allá de lo que puedan tener de abstracto, una cautela contingente frente a cualquier planteamiento teórico de nuevo cuño, inclusive en aquellos casos en que la novación que se pretende introducir no es esencial sino metodológica. Y en ese aspecto la génesis del Método de los Elementos Finitos y su evolución, en muchos sentidos asombrosa, merecen un análisis particular desde dentro de la ingeniería, o más bien desde la perspectiva de la Ciencia de los ingenieros⁵, entendiendo por tal el corpus de conocimientos que nos faculta para obrar, en general acertadamente. La ruptura metodológica que se produjo a partir de los años Cincuenta en los campos de la mecánica estructural y de la teoría de la elasticidad tiene valor primero como hecho en sí mismo determinante del curso actual de evolución disciplinar, y además como paradigma del *modus operandi* proactivo y finalista que dentro del ámbito general de la ciencia caracteriza a la ingeniería.

La historia del MEF cuenta con un antecedente más o menos inmediato en el denominado análisis matricial de estructuras reticuladas, que se basa en la representación discreta de las estructuras de ese tipo –predominantes en la edificación– a través de nudos y barras y la determinación de esfuerzos en cada uno de esos elementos por el método de la rigidez. Como recuerda el profesor Klaus-Jürgen Bathe del MIT, otro ingeniero que forma parte de los referentes indiscutibles en el campo de los métodos computacionales⁶, la mayor potencia matemática de la formulación algebraica asociada al método matricial de cálculo de estructuras en relación con el precedente método iterativo de reparto de Hardy Cross, animó a los investigadores a formular elementos discretos geoméricamente más complejos que simples barras rectas, y aplicables con mayor generalidad a la mecánica estructural. Así es como fueron surgiendo conceptos nuevos y más ricos como el de malla, y elementos finitos bi y tridimensionales aptos para modelizar el comportamiento tenso-deformacional de estructuras más complejas como placas y láminas, en problemas también de mayor enjundia, dinámicos y no lineales.

La historia del MEF también se encuentra adornada por nombres propios dentro de nuestro país y es justo mencionar a varios ingenieros españoles que han brillado personalmente en lo que se refiere al desarrollo científico-técnico, la enseñanza o la aplicación práctica de los métodos computacionales. Entre ellos hay que mencionar a un número significativo de investigadores de gran prestigio internacional entre ellos Enrique Alarcón, Juan Manuel Roësset, Eugenio Oñate, Miguel Ortiz, José María Goicolea, Manuel Casteleiro, Juan Carlos Simó, Carlos Ruiz, Xavier Oliver, Manuel Doblaré y Francisco Armero, quienes forman una muestra representativa del indiscutible talento y la talla científica-técnica de los especialistas españoles en el campo de la mecánica computacional.

El diseño en el mundo de la ingeniería –también en el de la arquitectura, aunque con matices– es un acto que aúna varios procesos nucleares, distintos pero estrechamente relacionados: (i) concepción; (ii) cálculo; en su caso (iii) simulación o experimentación; y siempre (iv) acción proyectual. De la concepción puede decirse que es la ideación primaria del objeto o artefacto a diseñar, mientras que el cálculo y la simulación/experimentación conducen a la comprobación sistemática y al refina-

miento de las ideas; finalmente la acción proyectual decidirá en esencia la especificación y establecerá la codificación formal del diseño, de tal manera que éste pueda transmitirse a otros de forma inteligible y completa para su realización material, construcción o fabricación según sea el caso. El diseño, como acto específico de creación, es necesariamente individual y colectivo a la vez.

La clásica referencia⁷ de Pahl, Beitz, Feldhusen y Grote sobre el diseño en ingeniería señala que en esta actividad concurren las circunstancias siguientes: afecta a casi todos los aspectos de la vida humana; emplea las leyes y conocimientos de la ciencia; se ejerce a partir de la experiencia; define los requisitos para la realización física de las ideas; y exige integridad profesional y responsabilidad.

Toda una declaración axiológica de la escuela germánica y sus rotundos esquemas de pensamiento sobre la ingeniería. Dentro de los teóricos anglosajones, algo más abiertos a la consideración de lo especulativo, Dixon por su parte y más tarde Penny⁸ sitúan el diseño en ingeniería dentro de la intersección de dos corrientes, una específicamente técnica y otra cultural, más amplia en su contexto. En ambos dominios del diseño, el intrínseco y el contextual, la modernidad contemporánea se manifiesta singularmente a través de dos hechos que se encuentran hoy profundamente influenciados por las tecnologías de la información, aunque cada uno de ellos con una capacidad generativa específica y propia: la eclosión de los modelos computacionales por un lado, y por otro la asombrosa dinámica de los procesos en red. La interacción hombre-computador y la colaboración interpersonal son dos características fundamentales del diseño y ambas se encuentran fuertemente mediadas por la tecnología informática.

Los métodos de diseño paramétrico permiten, debido a su automatización, experimentar virtualmente y alterar el diseño de manera esencialmente cómoda en relación con otras alternativas más físicas, y han sido fundamentados teóricamente y respaldados por la praxis de algunas de las firmas más reconocidas del mandarinato del lujo arquitectónico internacional⁹, de ahí su posición preeminente en el contexto contemporáneo del denominado diseño *high brow*. Farshid Moussavi reivindica ahora la función de los computadores en la génesis de la forma en arquitectura¹⁰ en términos bastante similares a la manera en que los grandes ingenieros del pasado, por ejemplo Nervi –y también algunos arquitectos como Louis Sullivan¹¹– defendían la forma como síntesis material de una función en general situada más allá de lo resistente¹². De los métodos paramétricos de diseño puede decirse, sin embargo, que su vigencia en el mundo de la ingeniería es por el momento más limitada que en el caso de la arquitectura, por razones en parte obvias –la arbitrariedad formal encaja en la primera menos bien que en la segunda, y lo visual no es en muchos casos lo más sustantivo a experimentar– y otras no tan evidentes que se tratarán más adelante.

Las tendencias que las tecnologías de la información imprimen a la praxis del diseño en ingeniería, no se circunscriben al uso creativo de los modelos geométricos y su algoritmia formal. Es preciso además tener en cuenta los efectos nada triviales del fenómeno Internet y sus epígonos: el ecosistema Google, las redes sociales, los juegos *online* y demás fenómenos reticulares e interactivos, asombrosos y potentísimos en sí mismos a pesar de haberse convertido ya en usos sociales relativamente corrientes. Las redes con su a menudo impredecible poder relacional, constituyen una novedad con indudable capacidad transformadora de la práctica de la ingeniería, y en particular de sus actos de creación y diseño. La globalización del acceso *online* a la información y el intercambio instantáneo de contenidos dos en cualquier formato imaginable, efectuados con pasmosa naturalidad a través de las redes y sistemas digitales de comunicación actuales, han supuesto la abolición

7. *Konstruktionslehre*. G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen y K.H. Grote. Traducido al inglés como *Engineering Design – A Systematic Approach*. (Springer Verlag, 2007).

8. *Design Engineering: Inventiveness, Analysis and Decision Making*. Dixon, J.R. (McGraw-Hill, 1966).

9. Entre ellas puede mencionarse a la célebre arquitecta Zaha Hadid, cuya obra en cierta medida se basa en la elaboración teórica de su colega Patrik Schumacher. Véase el artículo de este último titulado *Parametricism – A New Global Style for Architecture and Urban Design*, publicado en *AD Architectural Design*, Vol 79, nº4 (2009).

10. Véase *The Function of Form*, Farshid Moussavi (ACTAR, Harvard Graduate School of Design, 2009).

11. Suya es la conocida sentencia que reza ‘*form follows function*’.

12. Véase *Scienza o arte del costruire?*, Pier Luigi Nervi (Bussola, 1945).

13. PLM es el acrónimo del término *Product Lifecycle Management*, con el que se denomina actualmente a los sistemas informáticos de alto nivel aplicados a la ingeniería que integran funcionalidad de cálculo, simulación, visualización, infografía, control del cambio, mantenimiento, etc.

14. Andrew Feenberg, profesor de la universidad Simon Fraser en Vancouver y un estudioso reputado de la filosofía de la técnica, habla de una racionalidad nueva y un concepto de lo paradigmático que rebasa los planteamientos de Khun. Véase su obra *Between Reason and Experience – Essays in Technology and Modernity* (The MIT Press, 2010).

15. *The Smart Grid. Enabling Energy Efficiency and Demand Response*. Clark W. Gellings, CRC Press, 2009.

de las distancias y de buena parte de las barreras que hasta hace poco condicionaban la relación entre personas y equipos de diseño, especialmente los que se encuentran dispersos geográficamente o poseen diferente filiación orgánica y especialización científico-tecnológica. Los procesos colaborativos van tomando cuerpo y vigor sustancial en contextos que ya no se ciñen a los límites de una organización o empresa concreta, sino que trascienden y en cierto modo subvierten las prácticas tradicionales del diseño y el orden secuencial clásico en lo que se refiere al ciclo y los ritmos de la creación técnica: concepto, cálculo, experimentación y proyecto, tradicionalmente bajo el control de una misma entidad, al tiempo que añaden un elemento nuevo, singular e importante: el aprendizaje.

Ambos tipos de procesos informáticos, el computacional y el relacional, no sólo poseen una potencialidad contundente en el ámbito del diseño sino además una clara vocación paradigmática, que se realimenta con los avances que llegan a la ingeniería y a la arquitectura desde el mundo cambiante de las tecnologías de la información. Éstas constituyen un auténtico *driver* del cambio para ambas profesiones y no sólo un simple medio instrumental de apoyo como antes se creía. El uso de la informática desborda ampliamente hoy día los contornos del MEF y del CAD para llegar a conceptos mucho más amplios como el de PLM¹³, y la era en que se sitúa el mundo contemporáneo, la denominada 'sociedad del conocimiento', establece pautas nuevas que ya se entrevén con nitidez. Ello afecta a la base epistémica y metodológica de la técnica, en consecuencia también a su praxis¹⁴.

La inteligencia en red y la transición energética

La transición energética es un término que se emplea para referirse al proceso evolutivo actualmente en curso del modelo de provisión de bienes y servicios relacionados con la energía. Los cambios que entraña la transición no constituyen en sí mismos una novedad reciente, pero es cierto que se perciben con mayor claridad en los últimos tiempos, tanto a escala nacional como global. Tres son los principios rectores de mayor calado que inspiran el proceso: la descarbonización, la competitividad y la seguridad de suministro. El primero de ellos es consecuencia de la acción internacional para confrontar el cambio climático de origen antrópico y afecta a las propias fuentes de energía, así como a buena parte de los procesos involucrados en los sectores de la electricidad y los hidrocarburos, desde la producción hasta los usos y el consumo. El segundo proviene de la deseada evolución hacia unos mercados energéticos que deberían funcionar de manera más eficiente en términos económicos, superando las imperfecciones inherentes al modelo oligopolístico fuertemente arraigado en un buen número de países. Finalmente, la seguridad de suministro, que en un mundo donde los recursos se encuentran irregularmente repartidos y son origen de múltiples conflictos, se plantea en términos de diversidad de fuentes y suministradores, libertad de comercio y en último extremo aseguramiento en términos equitativos de la energía necesaria para hacer frente a las necesidades que marcan el bienestar social y el desarrollo económico de las naciones. Para hacer todo lo anterior posible existe un ingrediente básico y común en todas las recetas: la inteligencia en red, o bien las redes inteligentes, según el modelo de convergencia entre lo físico y lo digital que establece en el mundo de la energía eléctrica el concepto de *Smart Grid*¹⁵. Una definición operativa del mismo es la aplicación sistemática de dispositivos de sensorización y medida, comunicaciones en tiempo real, control y decisión inteligente a las redes de transporte y distribución de electricidad, incluyendo sus interfaces respectivas con las instalaciones de generación y consumo.

La red es manifiestamente uno de los iconos de referencia del siglo XXI, un concepto que sin ser específicamente original de nuestro tiempo ha alcanzado tal importancia en el imaginario público, que hoy día se piensa que nada relevante puede existir al margen de las redes. Desde Internet a las redes sociales, en buena medida inmateriales, pasando por otras que poseen una presencia física mucho más evidente y consolidada como pueden ser las del transporte, las redes son ya omnipresentes. Y es precisamente la conjunción virtuosa que en ellas se produce de conectividad, interacción e inteligencia lo que ha ido dando cuerpo y sustancia a una idea que ya se estaba anticipando en la última década del siglo pasado: «la sociedad en red»¹⁶. El mundo de la energía no es, ni mucho menos, una excepción en este sentido, y en concreto para el sector de la energía eléctrica el concepto de red es casi tan antiguo como la propia industria. Las redes eléctricas inteligentes suponen la incorporación de la electrónica, las tecnologías de la información y las comunicaciones digitales a la infraestructura de transporte y distribución de energía eléctrica, dando lugar a un cúmulo de posibilidades nuevas a la hora de gestionar y usar la electricidad. Para el consumidor ello significa la posibilidad de un uso mucho más informado y por tanto óptimo, incluso potencialmente a la «carta», conjugando la inteligencia de la red con aquella de la que puede disponer en su propio domicilio o negocio a través de la domótica. Personalizando así el uso de la energía en un contexto de mayor eficiencia y libertad, con consecuencias directas en términos de ahorro y conveniencia. Contadores inteligentes y concentradores de comunicaciones son, junto con otros equipos digitales especializados y la electrónica de potencia, las piezas esenciales que permiten establecer una relación bidireccional entre productores y consumidores, mediando la tecnología que las redes ponen a su alcance.

Las redes inteligentes, las *Smart Grids*, con su capacidad para integrar la producción intermitente de renovables, la generación distribuida, la distribución avanzada y el consumo eficiente constituyen una parte importante de la estrategia de descarbonización en la que se encuentran involucrados la mayoría de los países desarrollados y singularmente España. Por otra parte, el efecto innovador de las redes inteligentes se extiende más allá del dominio tradicional del suministro eléctrico, alumbrando usos de esta forma limpia de energía en otros ámbitos de aplicación menos convencionales. Entre ellos el del vehículo eléctrico, o híbrido-eléctrico, que puede constituir a medio plazo una alternativa eficiente y ambientalmente respetuosa a los medios de transporte basados en el uso de combustibles fósiles. Y quién sabe, más allá de todo lo anterior, qué nuevas posibilidades irán aflorando, hoy difíciles de prever.

Las redes inteligentes de energía y servicios, según el modelo de interacción de flujos que se dan entre lo físico (energía eléctrica) y lo digital (información en tiempo real) en la *Smart Grid*, muestran como la innovación tecnológica en el campo de las TIC y la electrónica de potencia provoca un fuerte impulso de modernización del sistema eléctrico en beneficio de todos. Y ello es así en el seno de una industria como la de la energía eléctrica, que se tiene por madura, entendiendo por tal su larga tradición de excelencia y servicio público.

A modo de conclusión: un curso sin límite conocido

La ingeniería es la profesión de la técnica, heredera de la *techné* de los griegos y del *ars latino*. Ha sido hasta la fecha y en esencia, la manera humana de transformar el mundo físico y con él quien sabe si también cambiar a la propia especie. La ingeniería nació con el hombre, o más precisamente con la civilización, hecho a través del cual el ser humano procura relacionarse en relativa armonía con el mundo que le

16. Este término fue felizmente acuñado por Manuel Castells, sociólogo español afincado en Berkeley en su obra *The Rise of the Network Society*. Blackwell Publishers, 1996.



rodea. Desde las primeras culturas de base hidráulica que se dieron en la antigua Mesopotamia, en la época conocida por los historiadores como la revolución del Neolítico, la técnica ha desempeñado un papel central en la evolución de la sociedad. Al menos tres eras de la ingeniería conocemos: la primera es la de la materia, que se refiere esencialmente a la construcción del hábitat; la segunda la de la energía, es decir el dominio del movimiento y la máquina; la tercera es la de la información, en la cual estamos actualmente inmersos y afecta profundamente a las relaciones interpersonales. La próxima revolución técnica quién sabe si no será la del tiempo vital, auténtica variable independiente de la voluntad humana, que a nuestra escala se manifiesta en la duración finita de la existencia individual y lo que tienen en ese sentido de inescrutables las leyes biológicas.

De la ingeniería inmemorial de las construcciones civiles que brilla con excelencia desde los tiempos de Roma, la sociedad ha ido pasando a la ingeniería de los procesos industriales que sustentan la producción masiva de bienes y servicios, para desembocar en la revolución que hoy vivimos en el campo infinitamente extensible de los sistemas digitales. Queda por encarar la era que será aún más difícil y enigmática, que tal vez se encuentre bajo el influjo de la ingeniería de la materia viva, de la aún balbuciente ingeniería biológica. La misión del ingeniero, de aquí al futuro, va a seguir siendo sin duda apasionante en su realidad consolidada y en la exigencia ontológica de cambio permanente.





INGENIERÍA Y NATURALEZA: UNA VÍA DE DOBLE SENTIDO

Manuel Elices

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Ciencia de Materiales*

Gustavo Guinea

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Ciencia de Materiales*

ETSI Caminos, Canales y Puertos Universidad Politécnica de Madrid

"¿Qué amables son todas tus obras!, y eso que no vemos más que una chispa. Todas viven y duran eternamente y obedecen en todas sus funciones. Todas difieren unas de otras, y no has hecho ninguna inútil. Todas son a cual más bella: ¿quién se saciará de contemplar su hermosura?" (Eclo 42, 22-25).

0. Introducción

El físico danés y premio Nobel de Física Niels Bohr ya prevenía que "hacer predicciones es muy difícil, especialmente cuando se trata sobre el futuro". No obstante, la Naturaleza puede ser una buena guía para predecir algunos aspectos –los estructurales– de la labor del Ingeniero de Caminos en el siglo XXI.

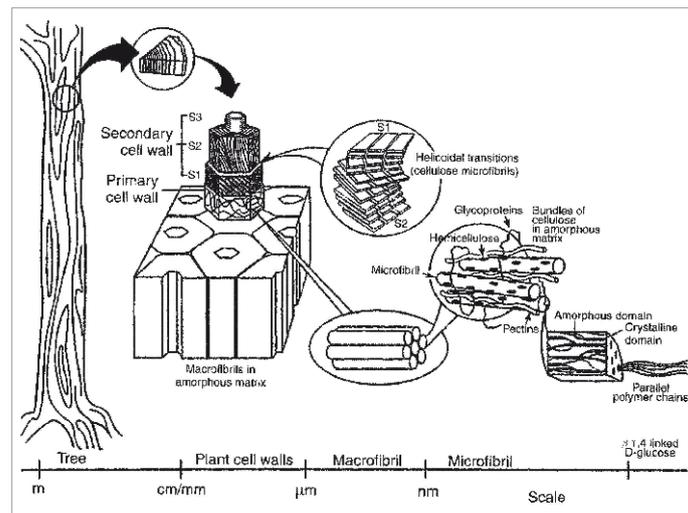
Las pistas que nos ofrece la Naturaleza permiten intuir que:

– En el futuro cada vez será más difícil distinguir entre material (o materia) y estructura (o forma). Los materiales serán multifuncionales, capaces de interpretar los estímulos que reciban y obrar en consecuencia. La estructura del material estará muy jerarquizada –como la madera del tronco de un árbol– y resultará difícil distinguir donde empieza el concepto de elemento estructural y donde termina el de material¹.

– La evolución de los materiales/estructuras en el futuro –ahora que ya somos capaces de diseñar materiales a la carta– seguirá las pautas de los materiales y estructuras que nos muestra la Naturaleza. Aquellos materiales que hayan alcanzado una situación estable apenas evolucionarán. Los que se vean sometidos a presiones nuevas tendrán que evolucionar y adaptarse. El biomimetismo será una fuente de inspiración ahora que se empieza a conocer con más detalle la estructura íntima de los materiales biológicos.

– El papel del ingeniero será cada vez más transversal y permitirá interaccionar con campos en los que actualmente apenas tiene contactos; las Ciencias de la Salud puede ser uno de ellos y, en particular, en el diseño de andamios para la ingeniería de tejidos.

En este artículo se apuntan algunas acciones que pueden realizarse en cada uno de los tres aspectos que se acaban de comentar.



1. El ingeniero transforma la naturaleza

Ingeniería y naturaleza son dos conceptos que habitualmente aparecen enfrentados en el debate social, especialmente desde el advenimiento de la Revolución Industrial y los abusos cometidos muchas veces sobre la tierra, las especies y los bienes naturales. Sin embargo la acción del hombre sobre la naturaleza —el medioambiente, utilizando el pleonasma de moda hoy en día— es antigua, y la transformación del medio natural no es algo nuevo ni necesariamente nocivo. El sobrecogedor y hermoso paisaje de Las Médulas, en la comarca del Bierzo, declarado Patrimonio de la Humanidad por la Unesco y punto singular de atracción turística, no es sino el resultado de la mayor mina de oro a cielo abierto explotada por el Imperio Romano, que empleó más de diez mil obreros y produjo casi dos mil toneladas de oro en sus 250 años de actividad desde finales del siglo I antes de Cristo². La Gran Muralla de China, construida en su mayor parte en el siglo V antes de Cristo, tuvo un impacto definitivo en el desarrollo social y ecológico de aquel país, afectando incluso a la diversidad genética de las plantas a uno y otro lado del muro³.

Frente a los que abogan por un retorno a una vida “natural”, identificada casi siempre con una vida “primitiva” carente de muchos de los recursos y comodidades actuales, es necesario reivindicar el ejercicio de una ingeniería al servicio del hombre que transforma la naturaleza para conservarla y mejorarla, gestionando los bienes naturales y evitando su degradación.

Multitud de ejemplos pueden ponerse que demuestran los beneficios de la acción humana: la lucha contra la desertización y la erosión, la gestión del agua y el aire, o la conservación de las especies son algunos bien conocidos. La protección y la mejora de la naturaleza es una responsabilidad frente a los más desfavorecidos y a las generaciones futuras, y la ingeniería, en especial la ingeniería civil, tiene mucho

2. Plinio el Viejo, *Naturalis Historia*, libro 33.

3. Su, H, L-J Qu, K He, Z Zhang, J Wang, Z Chen and H Gu. “The Great Wall of China: a Physical Barrier to Gene Flow?,” *Heredity*, Vol. 90, No. 3, Mar 2003, 212-219.

El paraje de Las Médulas, en la comarca del Bierzo, León, es una antigua explotación minera romana declarada en 1997 Patrimonio de la Humanidad por la Unesco.



que aportar. Aunque ha habido –y hay– excesos, son innegables los beneficios de una actividad tan antigua como el hombre, sin la cual no habría sido posible el desarrollo humano en todos sus aspectos tal y como lo contemplamos hoy en día.

El binomio ingeniería-naturaleza es pues antiguo y no falto de contradicciones. Sin embargo se trata de una vía de doble sentido en el que los dos ámbitos se influyen y complementan. En las líneas que siguen mostraremos cómo la ingeniería de los materiales y las estructuras bebe de la naturaleza como inspiración, es capaz de renovarla y mejorarla mediante sus obras y conocimientos, y coopera en la consecución de una vida más prolongada y saludable.

2. La naturaleza como inspiración

Los materiales y las estructuras han acompañado al hombre desde el principio de los tiempos. Difícilmente se encontrará una actividad humana donde no tengan protagonismo, siendo muchas veces imprescindibles para su ejecución. La alimentación, la vivienda, el transporte y las comunicaciones, la producción de energía o

La Gran Muralla de China fue comenzada a construir en el siglo VII antes de Cristo y tiene una longitud total cercana a los 9.000 km. Desde el siglo XVIII muchos autores han afirmado que sería posible verla desde la luna, pero su pequeña anchura (<10m) hace que esto sea irrealizable.



la salud dependen de ellos, y el nivel de bienestar de una sociedad bien puede medirse por sus progresos en la ingeniería de los materiales y las estructuras.

La naturaleza –animada o inanimada– ofrece una variedad casi infinita de materiales, estructuras y procesos armónicamente entrelazados que ofrecen soluciones óptimas para problemas complejos. El hombre ha sabido inspirarse –consciente o inconscientemente– en ellos y aprovecharlos para sus obras de ingeniería.

El poder de la intuición en imitar la Naturaleza

Las avispas construyen sus nidos partir de una pasta impermeable, parecida a la pulpa de papel, que elaboran con pequeños fragmentos de madera que mastican con saliva y cera. La reina comienza la construcción fabricando un peciolo del que cuelga todo el nido. Las celdas hexagonales se añaden alrededor y en ellas la reina va depositando sus huevos. La combinación de una estructura en forma de panal de abeja y un material compuesto a base de fibras de celulosa da lugar a nidos extremadamente ligeros y resistentes.

Las avispas construyen sus nidos con un material similar a la pasta de papel que ellas mismas producen a partir de fragmentos de madera. El nido de mayor tamaño conocido, de siete metros de longitud, se descubrió en abril de 2013 en el interior de una casa deshabitada de San Sebastián de La Gomera.



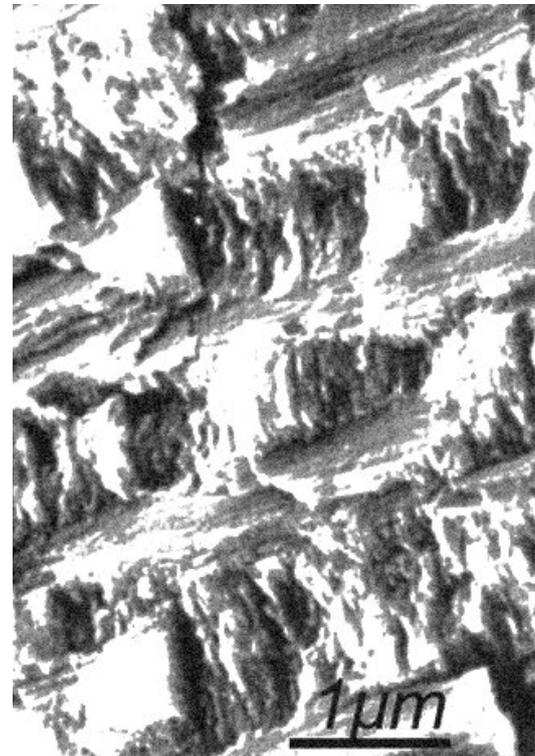
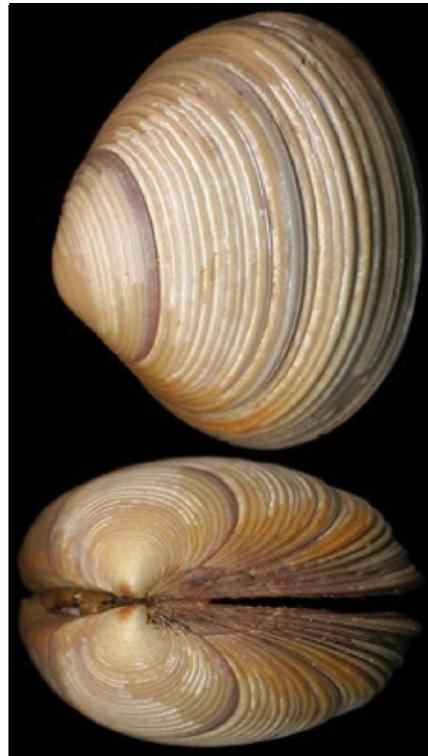
4. Kröger, N., "The Molecular Basis of Nacre Formation", Science Vol. 325, 11 Sept 2009, 1351.

Las conchas y caparazones de los moluscos son también estructuras extremadamente ligeras y resistentes a pesar de su pequeño espesor –de apenas unos milímetros– y de ser en más de un noventa por ciento material cerámico (carbonato cálcico). Su secreto reside en que, pese a su apariencia externa, no son monolíticas sino que están formadas por centenares de millones de pequeños ladrillos unidos por un mortero similar a la quitina, que representa menos del cinco por ciento del peso total⁴. Las múltiples intercaras y sus cambios de orientación evitan la propagación rectilínea de las grietas, aumentan la tenacidad y permiten acomodar deformaciones muy superiores a las que romperían el material cerámico puro.

La intuición humana ha hecho que procedimientos similares a los de avispas y moluscos se usen desde antiguo en la construcción. Hace más de 4000 años los antiguos egipcios y los habitantes de Mesopotamia mezclaban barro y paja para fabricar los ladrillos con los que levantar la mayor parte de sus edificios. Sólo los templos y las tumbas más señaladas se construían de piedra, más duradera. Para dotar a las construcciones de mayor estabilidad y resistencia los bloques alternaban su orientación, de forma parecida a la disposición de los ladrillos micrométricos en el delgado espesor de la concha de un molusco.

La intuición de reforzar un material mediante fibras más resistentes dispuestas según la dirección de los esfuerzos de tracción es la idea seminal del hormigón armado, patentado en 1867 por Joseph Monier. Las fibras de acero resisten los esfuerzos de tracción mientras el hormigón soporta sólo las cargas de compresión,

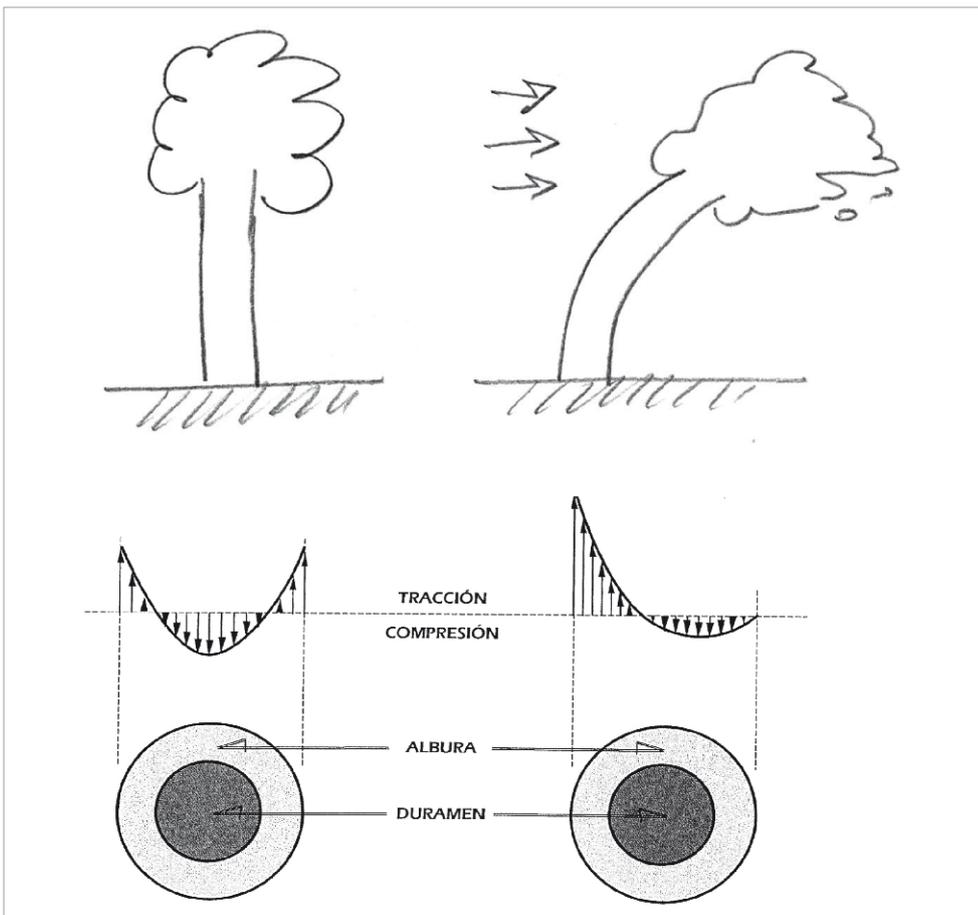
La concha de la *Dosinia ponderosa* esta formada por capas sub-micrométricas de carbonato cálcico que van alternando su orientación. Esta disposición permite alcanzar una resistencia a la fractura diez veces mayor que el material original.



Los rascacielos más antiguos fueron contruidos con ladrillos de barro secados al sol, como aún se hace hoy en día en Shibam, Yemen. Los anchos muros y el efecto chimenea provocado por su altura son muy adecuados para el control de la temperatura en países muy cálidos.



Los árboles evitan la compresión excesiva de su anillo exterior gracias a la pretensión inducida durante su crecimiento, que tracciona la zona externa y comprime la zona interior. Las compresiones producidas por la flexión eventual del tronco se contrarrestan con las tracciones producidas por la pretensión.



para las que es más competente. Las hojas de hierba, los tallos de las plantas y los troncos de los árboles comparten este esquema estructural, en el que sus células – que son muy alargadas– están alineadas preferentemente en dirección longitudinal, donde los esfuerzos de tracción son máximos.

Las células vegetales soportan bien la tracción ya que sus paredes están formadas por resistentes fibras de celulosa. Sin embargo son sensiblemente más débiles bajo cargas de compresión, en especial si están húmedas, ya que colapsan por pandeo. Por eso, los árboles dirigen las fuerzas de compresión hacia el duramen, la zona central del tronco formada por células muertas, más seca y densa, y por ello más resistente a compresión. Para lograrlo utilizan una técnica muy conocida por los ingenieros estructurales: el tronco del árbol es una estructura pretensada en la que la zona más exterior (albura) –formada por células vivas– esta traccionada, mientras que la zona interior (duramen) está sometida a compresión. Cuando el tronco flexa por efecto del viento –por ejemplo– se produce un incremento de la tracción en uno de los lados mientras en el otro se reduce la tracción pre-existente, sin llegar a comprimirse tanto como para colapsar.

El hormigón pretensado, desarrollado por Eugene Freyssinet a principios del siglo XX utiliza la misma idea: mediante barras de acero que se someten a tracción se precarga en compresión el hormigón, y se contrarrestan así los peligrosos esfuerzos de tracción que sobre él pudieran aparecer.

Imitando la naturaleza racionalmente

El desarrollo de técnicas más poderosas de observación y análisis ha permitido estudiar en profundidad la naturaleza, y entender mejor cuáles son los materiales y mecanismos que utiliza. Ello ha conducido a lo que hoy en día se conoce como biomimética o biomimetismo, aunque este nombre puede llevar a confusión: no se trata simplemente de copiar (mimetizar) las soluciones naturales sino de ir más allá y entender –y si es posible adaptar y mejorar– sus procesos.

Existen muchos ejemplos exitosos de biometismo. En el campo de los materiales para blindaje ya se están desarrollando paneles transparentes resistentes a impacto basados en la concha de la ostra *Placuna placenta*. Este material es casi transparente y tiene una resistencia a impacto diez veces superior a la del mineral puro.

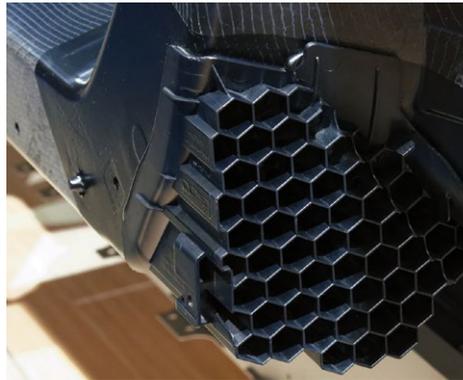
También los paneles auto-limpiantes son producto de la biomimética, ya que reproducen la estructura superficial de las hojas de la flor de loto (*Nelumbo nucifera*). Estas flores siempre están limpias pues el agua resbala por ellas sin adherirse y arrastra consigo las partículas de suciedad. Este efecto de “autolimpieza”, o efecto “loto” se debe a la presencia de micro rugosidades en la superficie que impiden que las gotas de agua se adhieran. Existen pinturas comerciales como Lotusan® que producen este tipo de micro-superficies en fachadas que se limpian solas después de cada lluvia.

El método más simple de imitar la naturaleza es copiar sus formas. Los paneles en forma de nido de abeja son un ejemplo de estructura ligera y resistente que se ha mimetizado para la fabricación de materiales compuestos. La “cúpula del milenio” –Millennium Dome– construida cerca de Londres para celebrar la entrada del tercer milenio dispone sus cables y nervios principales en forma de telaraña para dotarse de estabilidad y resistencia frente al viento y las acciones climáticas. Y hay muchos más ejemplos. Arquitectos como Antonio Gaudí o Eero Saarinen han reproducido formas vegetales y animales, y Frei Otto ha diseñado cubiertas laminares muy complejas basadas en las superficies de energía mínima producidas por membranas de jabón.

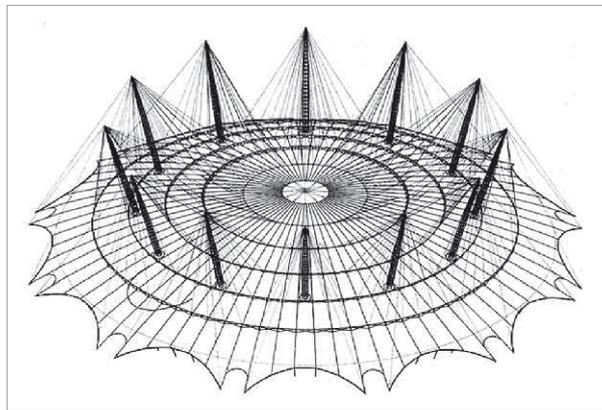
La concha de la ostra *Placuna placenta* es transparente y muy resistente a golpes e impactos. Su estudio es la base para el desarrollo de nuevos blindajes transparentes. En India, Filipinas y otros países asiáticos se utiliza de forma tradicional en ventanales, lámparas, bandejas y cuencos.



La disposición hexagonal de las celdas de los panales permite que pese a estar realizados de cera puedan soportar sin deformarse el peso de la miel que en ellos se deposita. Esta estructura ligera, rígida y resistente se utiliza en los automóviles y aviones más avanzados.



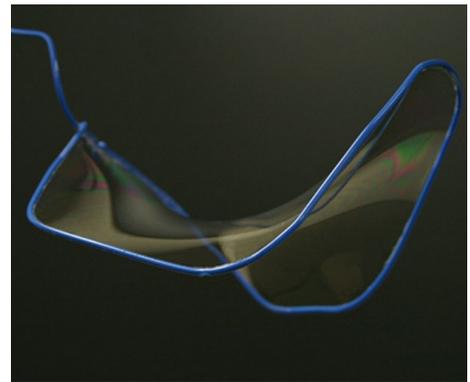
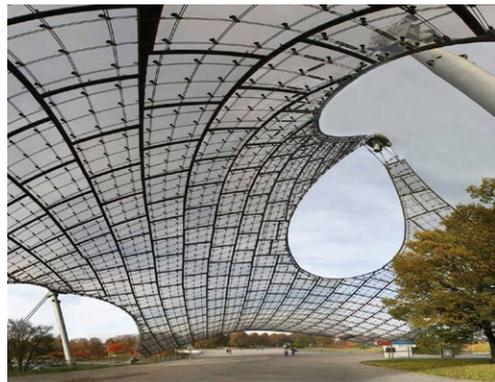
La estructura del Millennium Dome en Greenwich –Reino Unido– asemeja la forma de una telaraña orbicular. Las arañas tejen telas resistentes y estables al viento, que pueden soportar el colapso de algunos de sus elementos sin perder su integridad estructural.



Antonio Gaudí diseñó las columnas del Templo de la Sagrada Familia en Barcelona con forma de árbol. El centro de vuelo de la TWA del aeropuerto JFK de Nueva York, diseñado por Eero Saarinen en 1962 adopta la forma de un pájaro.



Las estructuras laminares de Frei Otto se inspiran en las superficies minimales que producen las membranas de jabón.



El radiotelescopio orbital HALCA, lanzado en 1997, desplegó su antena de 8m de diámetro mediante un mecanismo inspirado en el proceso de floración. Debido a las limitaciones de espacio y peso, todos los dispositivos enviados al espacio deben ser capaces de desplegarse eficazmente para alcanzar sus dimensiones operativas.



En el campo de los procedimientos, también la naturaleza muestra soluciones muy optimizadas que podemos aprovechar. El despliegue de los pétalos de las hojas o la eclosión de los insectos ha inspirado a los ingenieros aeroespaciales a la hora de diseñar estructuras articuladas más ligeras, fácilmente transportables al espacio, que se despliegan mediante mínimos movimientos para obtener grandes superficies.

Perspectivas de futuro

Materiales y estructuras han sido considerados tradicionalmente dos campos separados de la ingeniería, con objetivos y métodos de trabajo diferentes y bien definidos. Sin embargo en la naturaleza no existe tal distinción, y siempre es arbitrario establecer la frontera que separa el material de la estructura. Ello es debido a la extrema jerarquización de los materiales naturales que abarca –sin solución de continuidad– más de siete órdenes de magnitud, desde la escala molecular a la macroscópica. Conforme el progreso científico y tecnológico nos permite manipular y fabricar materiales a escalas cada vez más pequeñas, más nos acercamos al ideal del material natural y más se diluyen las fronteras entre material y estructura.

En la actualidad ya se fabrican materiales con estructura interna variando propiedades como la densidad o la composición. Las lentes GRIN (del inglés Gradient-Index) están realizadas con un polímero en el que el índice de refracción varía de forma continua, lo que permite fabricar lentes de caras planas y menor aberración, más fáciles de alinear en dispositivos complejos como fotocopiadoras y escáneres. En el campo de los materiales compuestos, los materiales con función gradiente (FGM, del inglés functionally graded materials) permiten una variación continua de composición para combinar las buenas propiedades de los materiales constituyentes. Estos materiales se han utilizado con buenos resultados en aplicaciones en las que es necesario combinar propiedades difícilmente conciliables en un material tradicional: en útiles de corte para máquinas-herramienta se requiere una elevada resistencia al desgaste –propia de los materiales cerámicos– a la par que tenacidad y soldabilidad –propias de los metales.

La multifuncionalidad, o combinación de propiedades diferentes en un mismo material es algo relativamente novedoso para la ingeniería que, sin embargo, la naturaleza lleva haciendo millones de años. Los hilos de seda de las telarañas incorporan fungicidas y bactericidas para defenderlos de las bacterias y hongos que quieren consumir sus nutritivas proteínas. En la antigüedad se aprovechaba esta cualidad antiséptica de la tela de araña vendando con ella las heridas.

La incorporación al hormigón de dióxido de titanio (TiO_2) favorece la descomposición por oxidación de contaminantes y bacterias y mantiene su superficie limpia. El TiO_2 posee un fuerte poder oxidante gracias a los pares electrón-hueco que generan los rayos ultravioleta de la luz solar. Recubrimientos de TiO_2 se vienen utilizando en Japón desde finales de los noventa para preservar limpias las tulipas de las lámparas de carreteras y túneles. El TiO_2 , activado por la luz ultravioleta de las lámparas descompone los compuestos procedentes de los tubos de escape de los automóviles⁵.

De igual modo los materiales biológicos “sienten” y “reaccionan”, dos características que aplicadas a los materiales artificiales los convierten en “materiales inteligentes”.

Aunque aún se está lejos de conseguir de forma rutinaria que los materiales reconozcan los estímulos y reaccionen, algunos resultados se muestran prometedores. En la industria aeronáutica ya es frecuente manufacturar elementos estructurales de material compuesto con sensores embebidos y en algunas estructuras de ingenie-

5. K.Hashimoto, H. Irie, A. Fujishima, "TiO₂ Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects", *Japanese J. Appl. Phys.* Vol.44, No.12 (2005) pp.8269-8285.

6. Wen S., Chung D.D.L., "Strain-sensing characteristics of carbon fiber-reinforced cement", *ACI Materials J.* (2005) 102(4), 244-248.
7. M. Maes, K. Van Tittelboom, N. De Belie, "The efficiency of self-healing cementitious materials by means of encapsulated polyurethane in chloride containing environments", *Construction and Building Materials*, 71, 2014, p.528-537.
8. H.M. Jonkers, "Self-healing concrete: a biological approach", S. van der Zwaag (Ed.), *Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science*, Springer, The Netherlands, 2007, pp. 195-204.
9. editorial "Mechanobiology in harness", *Nature Materials*, June 2014, 13, No 6, p. 531.
10. C. García-Herrera, D.J. Celentano, M.A. Cruchaga, F.J. Rojo, J.M. Atienza, G.V. Guinea, J. M. Goicolea, "Mechanical behaviour and rupture of normal and pathological human ascending aortic wall", *Medical and Biological Engineering and Computing*, Jun, 50(6), pp. 559-66, 2012.

ría especialmente avanzadas como grandes puentes y presas también se disponen sensores en su interior con el fin de conocer su estado y poder actuar en consecuencia. La incorporación al hormigón de fibras de carbono permite que el material "sienta" su deformación, ya que las fibras varían su resistencia eléctrica al alargarse⁶.

La mayor amenaza para la durabilidad del hormigón viene de la aparición y crecimiento de grietas en su interior, por lo que se han ideado algunos sistemas de "cicatrización". Se han fabricado hormigones que incorporan cápsulas con una sustancia plástica que una vez liberada –cuando las cápsulas se rompen por la fisuración– polimeriza y pega la grieta⁷. También se ha recurrido a la utilización de microorganismos capaces de precipitar carbonato cálcico en presencia de agua, y que se incorporan al hormigón a través de áridos que contienen sus esporas. Al incrementarse la humedad por efecto del agrietamiento, los microorganismos proliferan y precipitan carbonato cálcico que sella la fisura e impide su progreso⁸.

Los materiales actuales, provistos de una estructura interna aún rudimentaria, y muy modesta capacidad sensorial son sólo un primer paso en el camino. Podemos prever que en el futuro se construirán estructuras inteligentes capaces de interpretar los estímulos que reciben y obrar en consecuencia. Estructuras en las que –al igual que en los seres vivos– no será posible señalar una frontera clara entre sus componentes, ni tampoco entre sus funciones. Los materiales inteligentes del futuro sentirán las acciones externas y también su proceso de deterioro, y arbitrarán los medios necesarios para recuperar sus propiedades o –al menos– para avisarnos cuando necesiten ayuda.

3. Bioingeniería, Biomecánica y Biomateriales: mejorar la salud y la calidad de vida

El desarrollo científico de las últimas décadas nos ofrece técnicas y conocimientos para poder actuar sobre los materiales biológicos en toda su escala: moléculas, células, tejidos y órganos. Cada vez entendemos mejor los procesos naturales y somos capaces de modificarlos para tratar nuestras enfermedades y el deterioro producido por la edad. La Bioingeniería es una disciplina emergente que –muy probablemente– tendrá un protagonismo decisivo en los años venideros. De algún modo, la ciencia y la ingeniería –que hasta ahora se habían nutrido de la naturaleza como fuente de recursos e inspiración– dan en la Bioingeniería un paso al frente para ofrecer a la naturaleza, como contraprestación, nuevas soluciones para mejorar nuestra salud y las condiciones de vida.

Los avances en *biomecánica* están permitiendo esclarecer el efecto de los estímulos mecánicos sobre el comportamiento de células y tejidos. Las señales mecánicas –fuerzas, deformaciones, y también la rigidez y rugosidad del sustrato– afectan a la proliferación, diferenciación y al metabolismo celular, y tienen un papel crucial en el crecimiento, adaptación y regeneración de tejidos⁹.

En el campo de la mecánica arterial, los datos experimentales obtenidos mediante experimentos in-vitro y los avances en los modelos de simulación permiten cuantificar y predecir los efectos fisiológicos de la hipertensión arterial. Se puede predecir su efecto en relación con la distensibilidad y resistencia del tejido aórtico y señalar las zonas más débiles, propicias a la formación de aneurismas. Los modelos también permiten predecir la evolución del tejido de la pared y el efecto de la edad¹⁰.

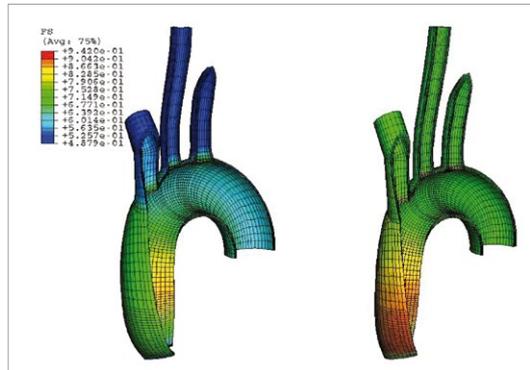
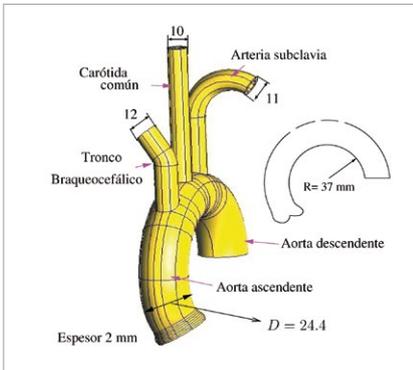
Los *biomateriales* están cobrando cada vez más un papel relevante como ingrediente imprescindible para la regeneración y sustitución de tejidos y órganos. El

objetivo inicial de buscar materiales inertes, que no interaccionen ni entorpezcan la actividad natural del organismo, se ha abandonado por irreal, y ahora se intenta que los biomateriales se comuniquen de forma adecuada con su entorno biológico. El biomaterial debe proporcionar un sustrato en el que las células –propias o trasplantadas– proliferen y formen nuevo tejido. Para ello debe ser estimuladas con las señales bioquímicas, eléctricas y –también– mecánicas adecuadas.

11. M. Elices, G.V. Guinea, J. Pérez-Rigueiro, G.R. Plaza, "Usos médicos de la seda", Investigación y Ciencia, 419, Agosto 2011, pp. 28-35.

Los biomateriales basados en proteínas de seda son multifuncionales y facilitan la adhesión de las células, estimulan su crecimiento y permiten su diferenciación en el tipo de tejido deseado. La posibilidad de fabricar con este material diferentes formatos como películas, hilos, membranas, geles o esponjas los hacen adecuados para diferentes aplicaciones, desde la regeneración de tejido óseo a la reconstrucción de ligamentos o la fabricación de implantes vasculares¹¹.

Los modelos biomecánicos permiten simular el comportamiento de los tejidos vivos frente a diferentes sollicitaciones mecánicas. La hipertensión arterial produce un cambio de la geometría vascular acompañado de un deterioro progresivo de las propiedades resistentes, que puede dar lugar a la aparición de aneurismas. C. García-Herrera, "Comportamiento mecánico de la aorta ascendente: caracterización experimental y simulación numérica", Tesis Doctoral, directores J.M. Goicolea y G. Guinea, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Noviembre 2008).



La regeneración y recuperación de lesiones en nervios periféricos necesita un sustrato que proteja y guíe la regeneración axonal. Los injertos fabricados con proteínas de seda, además de proporcionar la resistencia y rigidez adecuadas, son biofuncionalizables y permiten estimular separadamente el crecimiento de las neuronas motoras y las sensitivas.



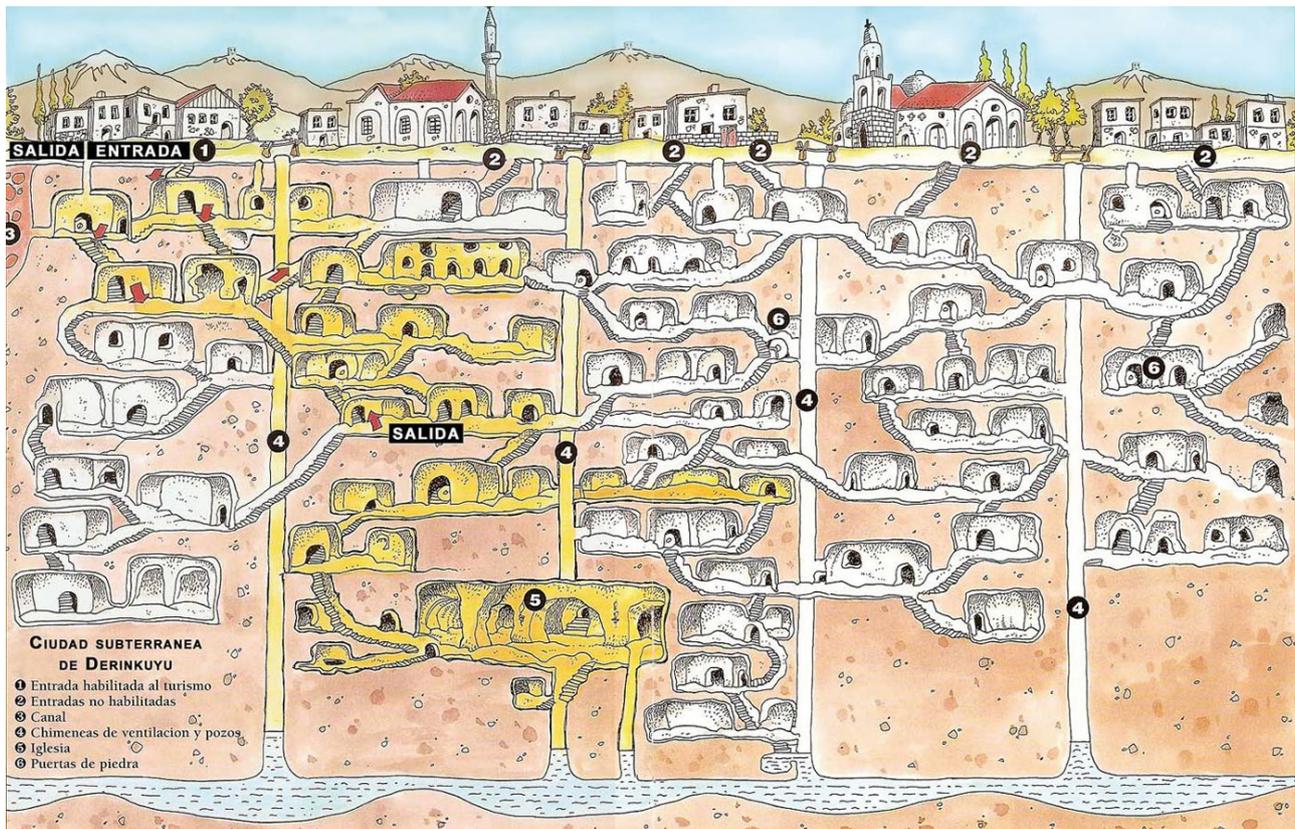
4. Conclusión

La Naturaleza ha sido una fuente de inspiración –consciente o inconscientemente– para el ingeniero, como puede deducirse observando sus obras. En algunos casos se ha limitado a *copiar* sus estructuras aprovechando su capacidad resistente mientras que en otros solamente las ha *imitado* por motivos estéticos; basta recordar las columnas y capiteles egipcios, griegos y romanos y, en los últimos siglos, los artistas del Art Nouveau junto con las recientes tendencias de los arquitectos/ingenieros naturalistas (Gaudí, Aalto, Saarinen, Piano, Calatrava...entre otros muchos)

Ahora, los avances en el conocimiento de la estructura y función de muchos seres vivos permite no solo imitar o copiar a la Naturaleza sino *optimizar* algunas funciones que la evolución todavía no ha logrado, o *diseñar* nuevas y más eficaces estructuras. Ha brotado una nueva rama de la ingeniería; el biomimetismo.

La analogía entre el tronco de un árbol y un elemento estructural –donde es difícil distinguir entre el material y la estructura– puede extenderse al bosque (conjunto de árboles) y la urbe (conjunto de estructuras), estableciendo así un continuo material/estructura/urbe. Nuevamente la Naturaleza nos ofrece ejemplos donde inspirarnos.

Mapa turístico de la ciudad subterránea de Derinkuyu en la región de Capadocia, Turquía. Se cree que los cristianos durante la época Bizantina (330-1461) aprovecharon y ampliaron las cuevas preexistentes para protegerse de las persecuciones religiosas. En Derinkuyu vivieron unas 20.000 personas y cuenta con 11 niveles de profundidad y numerosas entradas que la conectan con el exterior.



La armonía de un bosque es uno de ellos, pero la estructura de un termitero va más allá, y es una caja de sorpresas; posee un sistema de ventilación, acondicionamiento térmico, graneros y muchas cosas más. Algunos ingenieros urbanistas ya están planificando ciudades en buena parte subterráneas, donde el tráfico discurre mayormente por el subsuelo.

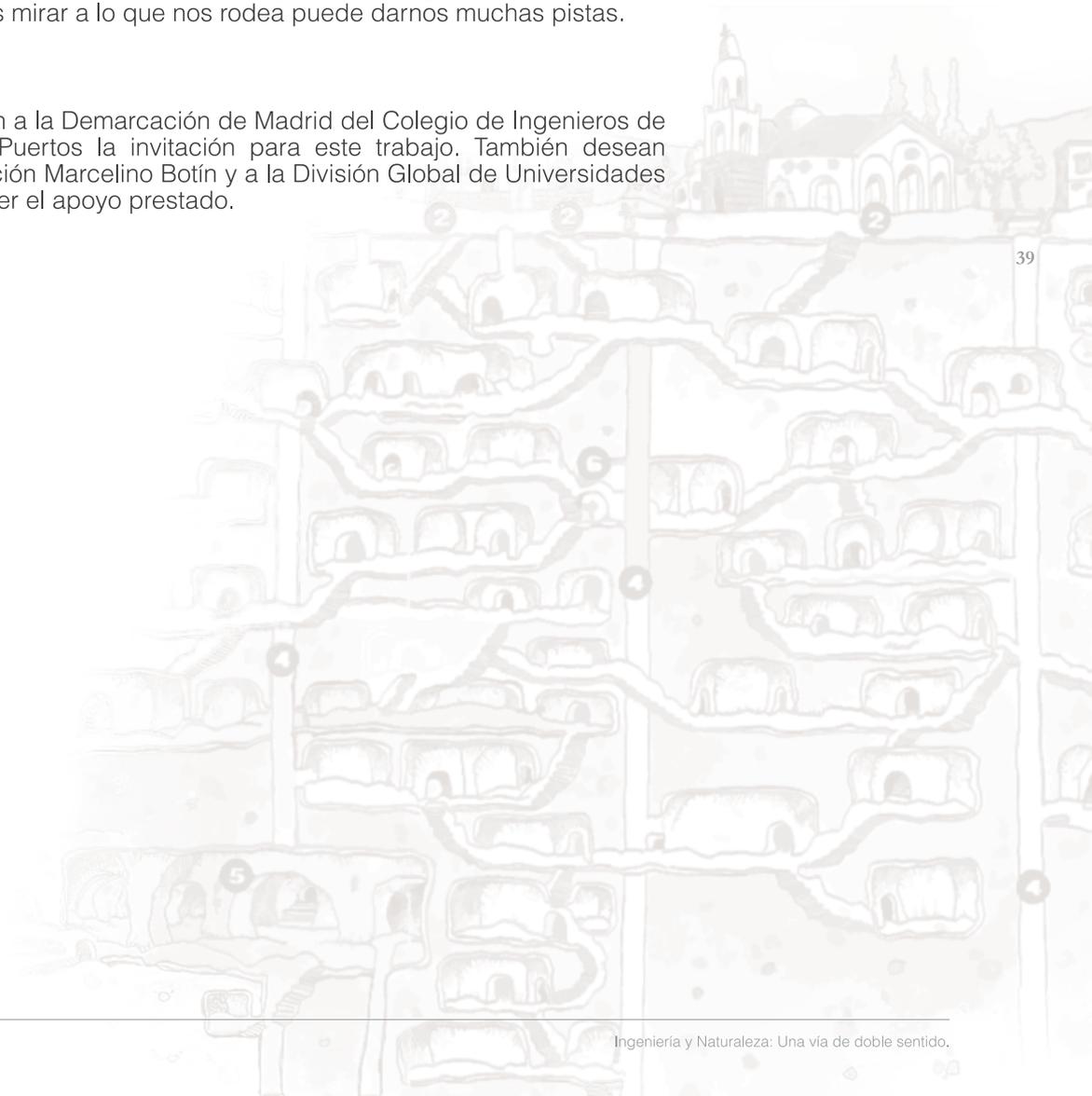
12. Hurriyet Daily News, "Massive ancient underground city discovered in Turkey's Nevşehir", December/28/2014.

Nuestros antepasados ya intuyeron las ventajas de las urbes subterráneas, no por el tráfico sino por otros motivos. En Derinkuyu (Turquía) hay una ciudad subterránea cuya antigüedad se remonta, por lo menos, al siglo octavo. Se calcula que en ella vivieron unas 20.000 personas y cuenta con 11 niveles en los que se reparten salas comunales, baños, pozos, graneros, establos para el ganado, tumbas, y canales de ventilación. En estos días se ha publicado la noticia del descubrimiento de otra urbe subterránea en Turquía, de más de 1000 años de antigüedad, y quizás la más grande del mundo¹². La milenaria urbe se encuentra también en la provincia de Nevşehir, en Capadocia y tiene más de siete kilómetros de túneles interconectados.

¿Qué nos deparará el futuro? Esta es una pregunta que seguirá siendo difícil de responder, pero quizás mirar a lo que nos rodea puede darnos muchas pistas.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Demarcación de Madrid del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos la invitación para este trabajo. También desean agradecer a la Fundación Marcelino Botín y a la División Global de Universidades del Banco de Santander el apoyo prestado.







INVESTIGACIÓN EN NUEVOS MATERIALES E INNOVACIÓN EN LOS EXISTENTES

Ignacio Calvo Herrera

Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Director de la Dirección de Innovación Tecnológica de ACCIONA Infraestructuras

María Pilar Górriz Ramón

Dra. Ciencias Químicas. Jefe de Área de Recursos de la Dirección de Innovación Tecnológica de ACCIONA Infraestructuras

La investigación en nuevos materiales es un elemento clave para las exigencias de las infraestructuras del siglo XXI. Cuando se habla de nuevos materiales en ocasiones, no se hace referencia a los últimos avances que se han realizado y se siguen realizando en materiales como el hormigón, betunes, etc. Estos materiales tradicionales han experimentado mejoras sustanciales en sus propiedades gracias a la utilización por ejemplo de nanotecnología, permitiendo su utilización en el sector de la construcción de una forma completamente novedosa.

En los últimos años también se ha observado como se utilizan materiales con nuevas prestaciones que permiten alcanzar retos hasta ahora desconocidos en el sector de las infraestructuras. Si bien no es una tendencia generalizada, sí se han abierto oportunidades a los materiales compuestos ampliamente utilizados en otros sectores como la aeronáutica o el sector automovilístico.

Por último, es un reto para el sector de la construcción, utilizar técnicas constructivas y materiales que permitan obtener infraestructuras más sostenibles. La reutilización de residuos de la construcción o de otras industrias así como técnicas de biorremediación permitirán este salto cualitativo de nuestro sector.

Por todo ello, es imprescindible tener en cuenta la importancia de la I+D+i. En un sector tan tradicional como el de la Ingeniería de Caminos Canales y Puertos es fundamental aprovechar los resultados obtenidos por los investigadores en los últimos años, para conseguir las máximas prestaciones de los materiales y de los procesos constructivos.

Hormigón y pavimento. Nuevos retos

El hormigón actualmente continúa siendo el material de construcción más usado en todo el mundo. Debido a su importancia, hoy día el hormigón no es considerado simplemente como una mezcla de cemento, agua y áridos, sino como un material que gracias a las nuevas tecnologías desarrolladas en el campo de los materiales de la construcción se puede diseñar “a la carta” con prestaciones mejoradas (smart concretes).

Actualmente se está investigando en el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías con el objetivo de cubrir las tendencias y necesidades más emergentes en el campo de construcción, como por ejemplo:

- Hormigones que permitan construir edificios energéticamente más eficientes gracias a un elevado aislamiento térmico, como hormigones celulares o ligeros para fabricar paneles, muros, soleras o rellenos de elevado aislamiento térmico y acústico.
- Hormigones más sostenibles fabricados a partir de residuos. Puede sustituirse parcial o totalmente tanto el cemento como los áridos por diversos tipos de residuos.
- Hormigones de alta durabilidad que incrementen la vida útil de las infraestructuras, bien sea con aditivos o adiciones en masa o bien aplicando recubrimientos.
- Hormigones autocompactantes que permitan reducir los tiempos de ejecución.
- Hormigones reforzados con fibras para reducir la armadura total o parcialmente a través de la utilización de nuevas fibras estructurales presentes en el mercado actual.
- Hormigones proyectados con reología mejorada para disminuir su índice de rebote.
- Hormigones con retracción compensada que permiten minimizar y en ocasiones eliminar la fisuración por retracción, evitando problemas futuros de durabilidad.

En el caso de materiales bituminosos la tendencia en el campo de la investigación está orientada a la sustitución de los ligantes tradicionales por bio productos o bien por la utilización de diversos residuos.

Las principales ventajas derivadas de la utilización de este tipo de productos son medioambientales ya que se consigue una reducción del impacto ambiental y consumos energéticos de la producción de betunes asfálticos, y de otras sustancias tóxicas asociadas al refino. Pero también existen ventajas técnicas, ya que se puede afirmar que la sustitución parcial de betún por estos bio-productos o residuos da como resultado mezclas asfálticas con un comportamiento mecánico similar a las tradicionales.

A efectos prácticos y para facilitar la comprensión de estos materiales para pavimentación, se pueden distinguir dos familias:

- Agentes bio-fluxantes: principalmente usados para remplazar “cutbacks” y betunes fluxados. Otros de los usos en el mercado actual son como aditivos para mezclas con altas tasas de asfalto reciclado logrando aumentar su trabajabilidad. Se han reportado usos como componente en emulsiones RSE (rapid setting emulsions), componentes prioritarios en lechadas bituminosas o en aplicaciones en frío donde se utilicen SSE (slow setting emulsions).
- Bio-ligantes: un bio-ligante es un sustituto, total o parcial, de un betún de origen petroquímico o en “cut-backs”. La gran mayoría de los bio-ligantes desarrollados tienen un color translúcido o coloreado por lo que pueden ser usados para potenciar el color natural de los áridos con fines estéticos.

Materiales compuestos, aplicaciones recientes

Si bien los materiales compuestos son de amplia utilización en sectores como la aeronáutica o el del automóvil, el sector de la construcción todavía no ha generalizado su uso, a pesar de las buenas propiedades que presentan estos materiales. Entre ellas cabe destacar su ligero peso frente a los materiales tradicionales así como su mayor durabilidad debido a que sufren muy pocos problemas de corrosión.

Hay algunos ejemplos de utilización de materiales compuestos en infraestructuras en el territorio español. Cabe destacar dos puentes carreteros, en Asturias (2004) y Comunidad de Madrid (2008) así como dos pasarelas peatonales en Madrid (2010) y Cuenca (2012).

En 2014 la Autoridad Portuaria de Valencia mediante concurso público, encargó la construcción de un nuevo faro para el puerto debido a que las obras de ampliación que se están llevando a cabo, dejan el anterior inservible al quedar en el interior del puerto.

La estructura del faro, se compone de ocho perfiles tubulares continuos de 25 cm de diámetro y 32,00 m de longitud que forman las aristas de un tronco de pirámide recto de bases octogonales regulares paralelas y cinco forjados de 20 cm de canto y cuatro anillos de rigidización. En el eje central del faro se dispondrá, una vez instalado éste en obra, una escalera de caracol de 2400 mm de diámetro exterior y 600 mm de diámetro interior, compuesta por una serie de peldaños de 200 mm de altura y 20° de ángulo central entre los que se intercala un descansillo de igual altura y 80° de ángulo central cada 14 peldaños. Una vez montado completamente el esqueleto del faro se trasladará en un transporte especial a las instalaciones portuarias de la ciudad de Valencia. Ya en el puerto, tras realizar todos los trabajos auxiliares necesarios para su colocación, se izará la estructura mediante grúas.

Las ventajas más importantes que se obtienen de realizar esta infraestructura en materiales compuestos se resumen a continuación:

- Mayor celeridad en la ejecución de las obras: el tiempo total de fabricación e instalación del faro es un 40% inferior a los que se ofrecería el proceso tradicional.
- Menor impacto en la operativa del puerto: además de que el tiempo total de ejecución del faro es más reducido, el tiempo en que el puerto se ve afectado es mucho menor, ya que el montaje de la estructura se realiza en taller. De esta manera, se reducen también la superficie y el tiempo de ocupación del puerto, los residuos y los ruidos en comparación con los trabajos habituales en la construcción de un faro.
- Prolongación de la vida útil del faro: una de las ventajas principales de la utilización de materiales compuestos de fibra de vidrio o de fibra de carbono en ambientes agresivos es que no se ven afectados por la corrosión. Esto los hace muy atractivos para aplicaciones en ambientes húmedos o en ambientes marinos, como es el caso de un faro, donde la utilización de otros materiales tradicionales suele ir acompañada de una degradación importante con la consecuente disminución en la duración a largo plazo de la estructura.
- Reducción de costes de construcción y mantenimiento: la utilización de materiales compuestos es más eficiente económicamente por la mayor celeridad de la construcción y el menor requerimiento de transporte de materiales. Además, a resistir mejor las condiciones ambientales, no requiere inversiones en mantenimiento.

Mejoras medioambientales en obras

El empleo de nuevos materiales y técnicas innovadoras en construcción ha sido útil para la mejora medioambiental en obra. Estas mejoras no sólo tienen que ver con la reducción de residuos, sino también con la utilización de técnicas basadas en la biotecnología, de amplia aplicación en otros sectores.

Algunos ejemplos de biotecnología aplicada al sector de la construcción son la aplicación de hongos micorrízicos para la mejora de la hidrosiembra en taludes así como la aplicación de técnicas de biorremediación mediante el uso de microorganismos para la descontaminación de suelos contaminados por hidrocarburos en presencia de metales pesados.

El uso de hongos micorrízicos en la hidrosiembra favorece el crecimiento vegetal en condiciones adversas de humedad y nutrientes, y sin necesidad de aplicar un manto vegetal orgánico, lo que favorece el crecimiento vegetal en taludes de elevada pendiente reduciendo los problemas asociados a la erosión de los taludes.

La aplicación de técnicas de bioremediación para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos y metales pesados no es una tecnología nueva, pero sí lo es en el sector de la construcción. Este tipo de tecnología, mucho menos invasiva reduce los movimientos de tierra en las obras y por lo tanto los costes de ejecución. Se pueden distinguir dos tipos diferentes de actuación:

1. Bioestimulación: consiste en la adición de determinados nutrientes al suelo que provocan la activación de microorganismos del propio suelo con capacidad de degradación de hidrocarburos.



Fotografía del faro en construcción.

1. La Visión para la Ingeniería Civil en 2025, American Society of Civil Engineers. Traducido por la Asociación de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (España), 2010.

2. Bioaumentación: consiste en la adición de microorganismos no patógenos al propio suelo, en concentraciones adecuadas, con capacidad de degradar hidrocarburos.

Este tipo de tecnologías permiten reducir hasta en un 80% la concentración de hidrocarburos en suelos en menos de un mes.

Conclusiones

Algunas de las conclusiones a las que se llegó en la Cumbre sobre el Futuro en la Ingeniería Civil realizada en Landsdowne, Virginia, del 21 al 23 de junio de 2006 fueron que los ingenieros civiles en 2025 deberían ser innovadores e integradores de ideas y tecnología en los sectores público, privado y académico y custodios del medio ambiente natural y sus recursos¹ entre otros aspectos. Por esas razones, la investigación el desarrollo y la innovación en nuevos materiales y técnicas constructivas así como su aplicación posterior, será elemento clave en el campo de actividad de los ingenieros de caminos, canales y puertos del futuro.

Aspecto de talud de desmorte antes y después de la hidrosiembra.

46







VIDA DE UNA INFRAESTRUCTURA

Gonzalo Arias Hofman
Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
INES Ingenieros Consultores

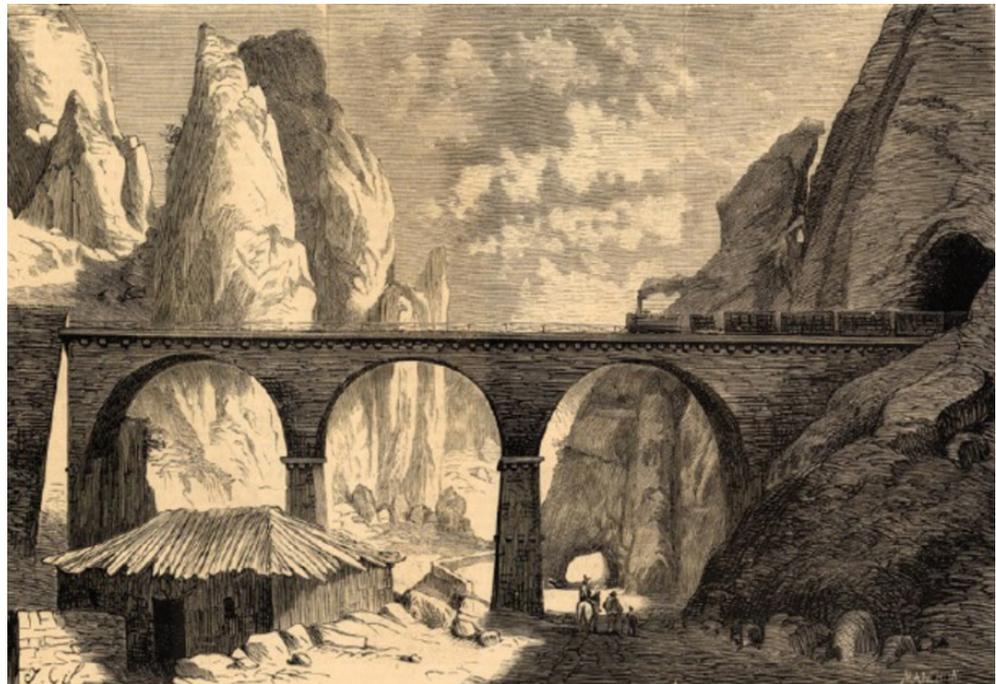
Pertenezco a una generación de ingenieros educada en la importancia del proyecto y la ejecución de las obras, acorde con las necesidades de una sociedad falta de infraestructuras globales y modernas, que dieran respuesta al dinamismo que ya se apuntaba. Fueron muy escasos los comentarios recibidos acerca, no ya de la importancia, siquiera de la necesidad del mantenimiento de estas infraestructuras que comenzaban a verse por doquier.

Y, casi como los organismos vivos, las infraestructuras se crean, viven y se deterioran, pero a diferencia de aquellos, pueden tener dos finales: la desaparición física o el renacimiento cual ave fénix convertidas en un ente distinto, normalmente más grande, capaz y esplendoroso. Y todas estas etapas del ciclo vital de una infraestructura requieren de unos medios y recursos para ser posibles, y de unos profesionales especializados que las atiendan.

Dentro de la vida de la infraestructura, la primera etapa, que es la parte más creativa, termina ocupando un espacio minoritario en las sociedades más desarrolladas, donde las principales infraestructuras construidas han llegado a encontrar casi un punto de equilibrio con las necesidades de aquellas. En el horizonte europeo en torno a 2015 se dibuja un panorama de inversiones en el sector de la construcción en el que el 75% correspondería a la explotación —reparación, refuerzo, rehabilitación, cambio de uso, conservación patrimonial, etc.— y el 25% correspondería a la obra nueva.

Es en ese punto dónde estamos cerca de encontrarnos en España, y estos años de crisis han puesto de manifiesto que ya no se considera una prioridad la construcción de nuevas infraestructuras.

Viaducto de Pancorbo. Grabado de 1860.



Tratando de hacer una lectura positiva, es necesario resaltar que el esfuerzo realizado en las últimas décadas, la "gimnasia" de los grandes proyectos llevados a cabo en el país es lo que permite a las empresas y profesionales encontrar una salida profesional en el mercado global del diseño, proyecto y construcción de nuevas infraestructuras, aunque es innegable que sin un mercado interior que mantenga el pulso, resulta más difícil encontrar vocación para los nuevos ingenieros.

La segunda etapa, que se corresponde con la vida de las infraestructuras y sus avatares, históricamente nunca ha recibido mucha comprensión y ha sido la última preocupación de unas Administraciones más volcadas en dotar al país de nuevas infraestructuras (o en inaugurarlas) que en asumir una realidad: los objetos se deterioran, a veces se estropean y siempre requieren de un mantenimiento.

Al cabo de estos últimos veinte años de profesión, creo que nos encontramos en la etapa en la que la sociedad asume que una parte del presupuesto se debe destinar a la conservación, entre otras razones, porque también la sociedad se ha vuelto más exigente con las condiciones en que encuentra los bienes que utiliza. Ya no vale con llegar a un destino, se quiere llegar rápida y cómodamente: los atascos, los baches, la falta de señalización, la suciedad, etc., son factores que provocan reclamaciones y las Administraciones reaccionan habilitando medios para minimizar éstas.

Por supuesto, hay una responsabilidad en la conservación de las infraestructuras ante los riesgos inherentes a cualquier obra en servicio. Pensemos en el colapso de una infraestructura: si éste se ha producido por un evento extremo puede tener una cierta justificación, pero si el fallo se ha debido a una falta de mantenimiento, ya no parece propio de un país responsable.

Viaducto de Pancorbo. Fotografía actual.



En sociedades más avanzadas que la nuestra, aunque aquí ya lo empezamos a esbozar, se viven ya exigencias mayores bajo el amplio espectro de la gestión de activos (asset management): se calcula el coste completo de la vida útil de una infraestructura, contabilizando el coste de su construcción y su mantenimiento en unos estándares de calidad determinados. Esto implica cambios en el diseño de una infraestructura para dotarla de una mayor durabilidad, en aras de reducir operaciones de mantenimiento.

El ingeniero consultor se está convirtiendo en una figura cada vez más común, como parte del equipo de proyecto, puesto que gran parte de las decisiones que se toman requieren una justificación valorada en términos económicos, como respuesta a la pregunta: ¿cuánto me cuesta y qué riesgo asumo por no realizar una determinada actuación en un año determinado?.

Postergar unos años una intervención como es la sustitución de los apoyos de un viaducto, a pesar de haber superado su teórica vida útil, puede tener un impacto económico muy importante en una autopista donde el propio viaducto suponga el 80% del valor de la concesión. O emplear un sistema de protección de los elementos metálicos más caro y duradero frente a la opción de pintar un mayor número de veces, por el impacto de los costes de afección al tráfico y medios de acceso.

Colapso de una infraestructura ferroviaria por una avenida extraordinaria.



Futura ampliación del puente de Rande en Pontevedra.



Son innumerables los ejemplos de infraestructuras creadas y construidas para unas necesidades concretas, que se han ido readaptando a las nuevas situaciones de servicio. El primer ejemplo que me viene a la cabeza es el ferrocarril tradicional, creado y construido en la segunda mitad del s. XIX para unas cargas y velocidades radicalmente diferentes a las que actualmente soportan y que ha conseguido adaptarse a estas nuevas condiciones de explotación, mediante una mejora continua de su infraestructura que a veces pasa, por desgracia, desapercibida. Estas mejoras han consistido en la sustitución parcial de algunos puentes originales de madera y de hierro por estructuras más 'modernas' de fábrica y de acero, una ligera modificación del trazado de las vías o la protección de las obras de tierra para evitar los desprendimientos sobre la vía.

Otro ejemplo son las infraestructuras hidráulicas del s. XIX, de las que el Canal de Isabel II es otro claro exponente de cómo hoy en día seguimos utilizando infraestructuras creadas hace más de 150 años por nuestros mayores.

Las infraestructuras aeroportuarias, con el complejo de Barajas como primer exponente, son otra muestra de cómo aprovechar durante más de 100 años unos bienes a base de crecimiento y transformación continua, no solo en lo que respecta a las instalaciones, sino en todo lo relativo al funcionamiento de un aeropuerto (gestión del tráfico aéreo, tránsito de mercancías, convivencia con otras redes de transporte, ...).

Finalmente, no quiero dejar de mencionar el Estadio Santiago Bernabéu, como infraestructura viva y en uso, que ya ha sido fruto de diferentes modificaciones y ampliaciones a lo largo de sus 60 años de vida (básicamente 1947/53, 1982, 1994, 2004) que le ha permitido ir adaptándose a las diferentes normativas y exigencias de los espectadores y del espectáculo. Esto se ha hecho aprovechando lo existente, afectando en la menor medida posible al funcionamiento del estadio sin renunciar a lograr en ninguna de las intervenciones la máxima calidad.

Como conclusión, podríamos afirmar que el propio ciclo vital de las infraestructuras exige la formación y participación de ingenieros especialistas en cada una de sus etapas, como respuesta a una sociedad que entiende que las infraestructuras cuestan cuando se construyen, pero también cuando se mantienen, pero que es cada vez más exigente con la adecuada gestión de las mismas en toda su vida útil.

Los ingenieros no solo proyectamos y construimos, también mantenemos, reconstruimos y de-construimos. Aunque en los últimos años se ha podido percibir la ingeniería de caminos como una profesión destinada a ser ejercida en el extranjero, seguirá habiendo una necesidad de técnicos que ayuden a transformar, conservar y explotar lo ya construido dentro de España. Al igual que las necesidades han cambiado mucho en los últimos veinte años, debemos ser capaces de reinventarnos nuevamente para dar respuesta a las exigencias de la sociedad en la que nos movemos ahora.

Este cambio tiene que ver con otras líneas de trabajo, relacionadas con nuevos materiales y tecnologías, técnicas de comunicación y gestión de datos, un mayor conocimiento de otras áreas de conocimiento como la química y también con la recuperación de conocimientos antiguos, como la historia y la arqueología, que nos dejen entender el pasado para respetar lo existente y aprovechar mejor las infraestructuras construidas.

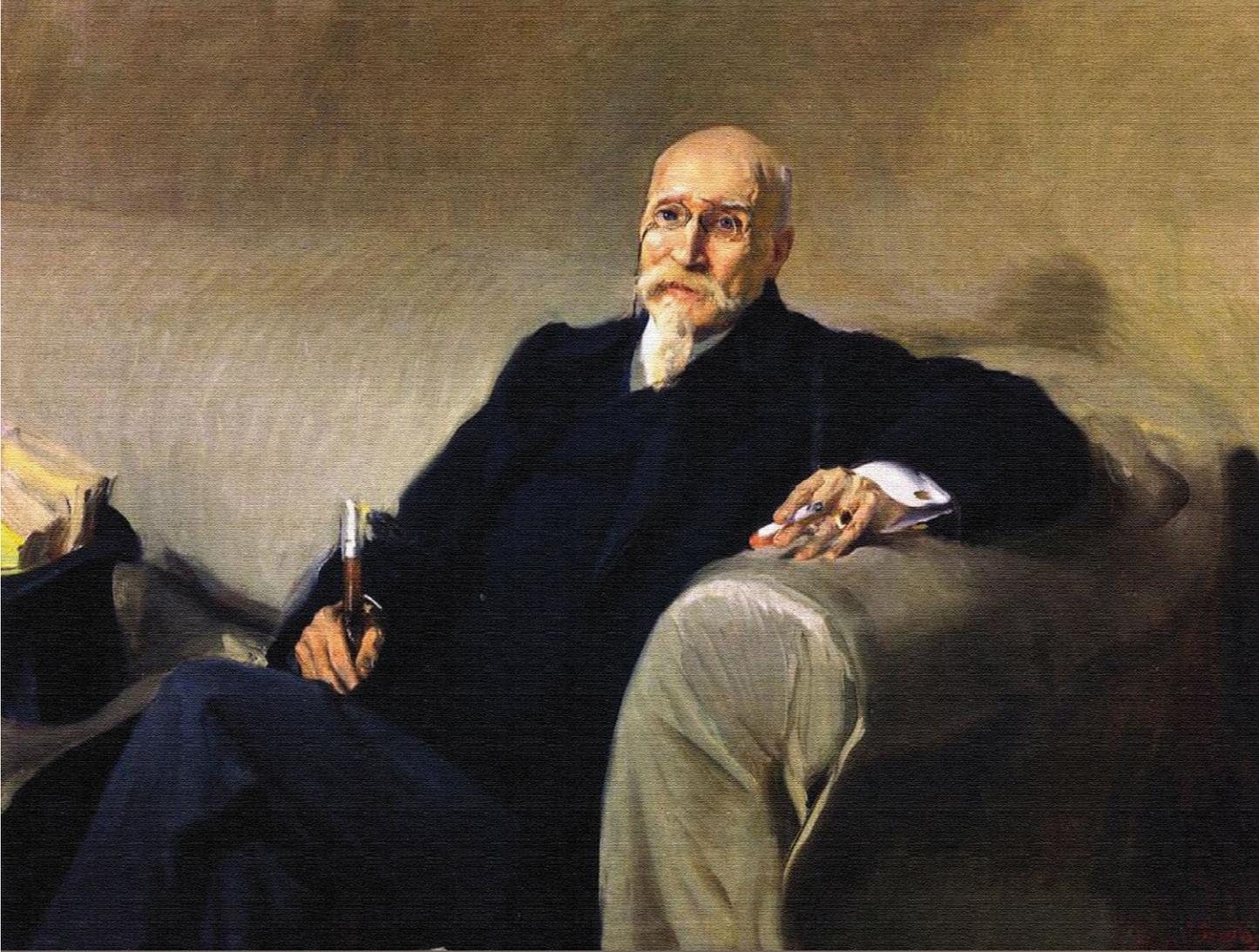


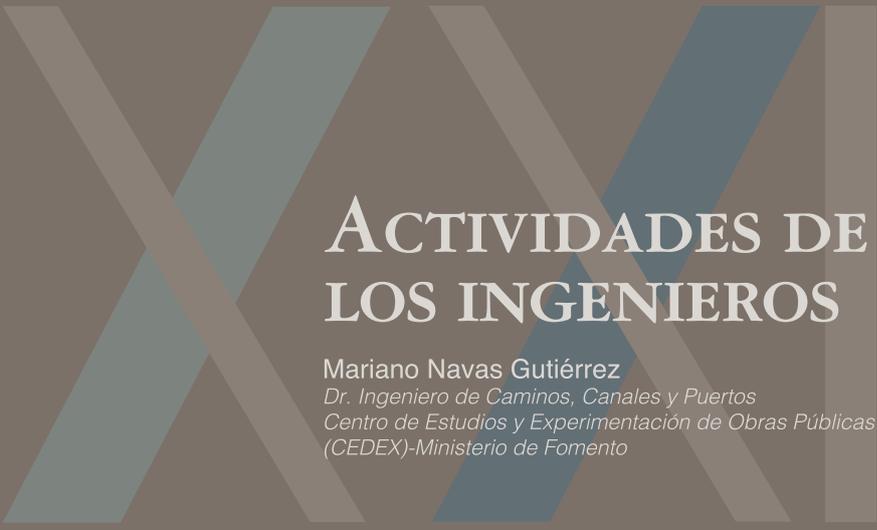
Fotografías del Estadio en la década de los 50, tras el Mundial de fútbol de 1982 y en la actualidad.



55







ACTIVIDADES DE LOS INGENIEROS

Mariano Navas Gutiérrez

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

*Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
(CEDEX)-Ministerio de Fomento*

Iniciaba Juan Benet su ponencia titulada “Ingeniería y conducta social” en el III Congreso Nacional de Ingeniería de España, organizado por el Instituto de Ingeniería de España del 10 al 14 de julio de 1991, con las siguientes palabras:

“En la actividad del hombre, individual y social, especulativa o práctica, y desde la más sublime hasta la más grosera, tiene hoy día una intervención la tecnología”.

Y sostenía Benet en esa ponencia que “...cabe llamar ingeniero al individuo que interviene en la concepción, el proyecto o la elaboración de un nuevo objeto tecnológico”. Y es precisamente para esas actividades, entiendo, para las que tiene que formarse el ingeniero, tanto en su fase académica como, sobre todo, en su vida profesional: aprender haciendo.

Así las cosas, establecer el ámbito de actividad del ingeniero supone conocer la demanda tecnológica de la sociedad que es, esencialmente dinámica, sin olvidar que, a veces, esa demanda viene impuesta por otras tecnologías, que ofertan a la Sociedad posibilidades no conocidas por ella de antemano. En este último caso, la Sociedad no juega directamente un papel activo, cogiendo el protagonismo la innovación, o mejor, la I+D+i.

La distinción entre titulaciones profesionales en estos ámbitos puede resultar puramente académica y se corresponde más bien con riñas por atribuciones legales de cada profesión que ignoran, en mi opinión, que la formación académica sólo es una parte, esencial desde luego- pero sólo una parte-, de la formación del ingeniero.

Oscar Tusquets en “Algo de Ingeniería. La oculta belleza de lo racional” decía:

“La distinción entre arquitectos e ingenieros, mejor dicho, entre buenos arquitectos y buenos ingenieros, es puramente académica. Esto es lo que nos separa: la facultad donde estudiamos y las atribuciones que nos concede la ley. Mucha gente piensa que nos distingue el tipo de problemas al que debemos enfrentarnos, que mientras ingenieros resuelven problemas estrictamente prácticos, a los arquitectos se nos confían tareas más humanísticas, artísticas, que se dirigen también al espíritu. Esto es muy relativo...”. Continuaba Tusquets preguntándose si no es espiritual el diseño de un puente para “superar con ingenio y coraje un agreste barranco que ha aislado a dos comunidades”. Dicho de otro modo, la solución de problemas prácticos no impide que ésta sea igualmente artística, dirigida al espíritu. Que ésta sea o no sea así, depende del talento de sus autores.

Como decía Eduardo Torroja Miret en “Razón y Ser de los tipos estructurales” “construir por construir resulta demasiado costoso para servir de juego a los hombres maduros de ésta y de todas las épocas... Las obras no se construyen para que resistan. Se construyen para alguna otra finalidad o función que lleva, como consecuencia esencial, el que la construcción mantenga su forma y condiciones a lo largo del tiempo. Su resistencia es una condición fundamental, pero, no es la finalidad única, ni siquiera la finalidad primaria”. Así las cosas, por supuesto, que el ingeniero se tiene que involucrar, también, en los aspectos funcionales y estéticos y no atrincherarse exclusivamente en los aspectos resistentes.

Llegado a este punto considero oportuno recordar la frase pronunciada por D. Carlos Fernández Casado durante su intervención en la manifestación vanguardista del Grupo Gallo en el Ateneo de Granada: “Víctor Hugo pedía en nombre del Arte que las locomotoras aparecieran como dragones vomitando llamas, pero Vds., señoras y señores, no reclaman formas de pájaro para los aviones, ni se entristecen porque de los trasatlánticos hayan desaparecido los mascarones de proa”.

Una de las características seculares de la ingeniería civil es su habitual interacción con la Naturaleza. Según Zubiri la técnica es “invención de realidades por dominio de realidades”, lo que le lleva a sostener a José Antonio Fernández Ordoñez que “ésta es la gran diferencia entre una presa y una escultura: en ésta no hay dominio, sólo invención”.

Sirva lo dicho para indicar que el listado de las actividades de los ingenieros- no me refiero naturalmente a un ingeniero individual – hay que encontrarlo en el amplio espectro de la técnica, que por su propia naturaleza se regenera a sí misma, en un proceso permanente de progresar sobre lo superado u obsoleto. Si bien es necesario significar que no es lo mismo el técnico y el ingeniero. Existe la técnica del ingeniero, naturalmente, la cual constituye su instrumento fundamental pero se requieren otros ingredientes para que se pueda hablar del arte de la ingeniería.

Agustín Betancourt y Molina, el padre de la profesión de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y que había fundado en España la primera Escuela de Caminos y Canales en 1802, creó en 1808 en San Petersburgo, con el apoyo decidido del Zar Alejandro I, la primera escuela técnica superior de ingenieros en Rusia cuyo objetivo era, según palabras del propio Betancourt, “proveer a Rusia de ingenieros que al graduarse, puedan ser designados para realizar cualquier obra en el Imperio. Por consiguiente, es menester que al término de la carrera los discípulos conozcan los principios fundamentales de la ciencia y su aplicación práctica en el arte de la ingeniería”.

Naturalmente, entiendo, dicha aplicación práctica tendría que estar estrechamente vinculada con las necesidades tecnológicas requeridas por la economía del país en cada momento. Por ello, resulta interesante destacar, como indica en su artículo “Betancourt y la puesta en marcha del primer Instituto superior de Ingeniería civil en Rusia” de V. Pavlov, incluido en el Catálogo de la Exposición “Betancourt. Los inicios de la Ingeniería Moderna en Europa”, publicado por el Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo del CEDEX, que al inicio el Instituto estaba autorizado para contratar a siete profesores: dos de matemáticas puras, dos de matemáticas aplicadas y de construcción, un profesor de hidrología y estadística y otros dos de dibujo técnico y arquitectura, lo que acredita la preparación científica que se impartía en el Instituto, base sólida para su aplicación práctica ante cualquier problema ingenieril que se pudiera presentar.

El mismo criterio mantiene, de alguna manera, muchos años después, José Antonio Fernández Ordoñez cuando afirma en el Prólogo del Libro “Profesiones. La ingeniería. Caminos, Canales y Puertos,” en 1993 que “la gran formación básica y la dura disciplina de trabajo que se adquiere en nuestras escuelas durante años de estudio capacitan a los jóvenes ingenieros para desarrollar las más heterogéneas actividades, con aptitudes para convertirse en pocos años, por ejemplo, en magníficos funcionarios al servicios de las diferentes Administraciones públicas, o bien en ejecutivos de las más diversas empresas ajenas al mundo de la ingeniería civil”.

Efectivamente, en nuestra profesión ha habido, Presidentes de Gobierno, Presidentes del Congreso, Ministros, Secretarios de Estado, Diputados y Senadores, financieros, inventores, empresarios, escritores, periodistas y un largo etc. Incluso un Premio Nobel y un Beato.

El caso de Práxedes Mateo Sagasta es paradigmático. Antes de fundar el partido liberal, que, como es sabido, junto con el partido conservador de Cánovas del Castillo constituyeron el sistema bipartidista con alternancias en el Gobierno que caracterizó a la Restauración, había estado destinado en la Jefatura de Obras

Públicas de Zamora e intervenido en proyectos, tales como la carretera Zamora-Orense y luego en los estudios de ferrocarril entre Valladolid y Burgos. También fue de interés recordarlo a estos efectos - profesor de la Escuela de Ayudantes de Obras Públicas.

Igualmente paradigmático es el caso de José de Echegaray, que en 1904 recibió el Premio Nobel de Literatura, el primero otorgado a un español. Echegaray fue Secretario de la Escuela de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y profesor de matemáticas, estereotomía, hidráulica, geometría descriptiva, calculo diferencial y física. También fue profesor de la Escuela de Ayudantes de Obras Públicas. Fue nombrado Director General de Obras Públicas y, posteriormente, Ministro de Fomento. Luego, Ministro de Hacienda.

Más recientemente, en la I legislatura, entre febrero de 1981 a diciembre de 1982, el Presidente de Gobierno fue Leopoldo Calvo Sotelo y Bustelo, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la promoción de 1951, con el número uno. Entre sus actividades profesionales, cabe destacar las que ejerció durante muchos años en Unión Explosivos Riotinto. También fue Presidente de Renfe y luego Ministro de Comercio, Ministro de Obras Públicas, Ministro de Relaciones con las Comunidades Autónomas y Vicepresidente del Gobierno para Asuntos Económicos.

Actualmente, en esta legislatura 2011-2015, el Presidente del Congreso, tercera máxima autoridad del Estado según la Constitución, tras el Rey y el Jefe de Gobierno, es un Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, Jesús María Posada Moreno, que ha sido Presidente de la Junta de Castilla y León, Ministro de Agricultura, Pesca y Alimentación y Ministro de Administraciones Públicas.

De entre los empresarios y banqueros destaca de forma indiscutible José María Aguirre Gonzalo, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la promoción de 1921, Escuela de la que fue catedrático de Contabilidad y Organización de Empresas. En su biografía empresarial figura ser fundador de la empresa de construcción Agromán, presidente del Banco Guipuzcoano, del Banco Español de Crédito y del Banco de Desarrollo Económico y Social. También, como es sabido, participó en la creación del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, del que fue su primer presidente, y del Colegio Universitario de Estudios Financieros (CUNEF).

Entre los inventores, es obligado mencionar a Leonardo Torres Quevedo, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la promoción de 1876, inventor de dirigibles, máquinas analógicas de cálculo y sobre todo del transbordador aéreo que atraviesa las Cataratas de Niagara, todavía en servicio.

Decíamos que la profesión cuenta incluso con un Beato. En efecto, Álvaro del Portillo Díaz de Sollano, que fue beatificado en septiembre de 2014, en el papado de Francisco, era Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Podíamos continuar con otros muchos Ingenieros de “antes” y de “ahora” que han destacado en distintas actividades, aparte de las tradiciones de proyecto y construcción de infraestructuras, pero seguramente nos apartaríamos del objetivo último de este artículo. Simplemente significar que haberlos, los hay.

Hay otra cuestión que, a mi juicio, resulta necesario comentar y a la que seguramente me debería haber referido con anterioridad. Se trata de la vocación ingenieril.

Hay una anécdota que se le atribuye a Benet según la cual un periodista se le acercó y le preguntó que cómo siendo una de las más sólidas voces de la literatura castellana, seguía dedicando tanto tiempo a su profesión de ingeniero, a lo que contestó: y

qué quiere usted joven, que me dedique a la mendicidad. Esto lo cuenta Borrell en su presentación a la primera edición de “Prosas Civiles” de Juan Benet, editado por el Colegio de Caminos, Canales y Puertos. En este caso, naturalmente, está acreditada sin sombra de duda la gran vocación ingenieril de Benet, pero eso no impide que, también, al tratarse de una profesión y no de un sacerdocio, la necesidad de “ganarse la vida” tenga su componente en la vocación, al menos en comparación con otras alternativas. Por cierto que la frase también pone en evidencia la falta de fe de Benet en poderse ganar la vida con la literatura.

Seguramente lo dicho requiere algún matiz, en absoluto irrelevante. Por lo que se refiere a la vocación ingenieril, como explica D. Carlos Fernandez Casado, “los actos profesionales no son secundarios en la vida de la persona, la profesión no es nunca *modus vivendi*, es *vivir*”. Y es que, seguramente, hay que distinguir entre los que poseen el título académico de ingeniero y los que, además, se sienten ingenieros. No es lo mismo.

Decía José Antonio Fernández Ordoñez en su discurso de toma de posesión como Presidente del Colegio Nacional de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, en diciembre de 1974, que “quizá sea en los jóvenes ingenieros donde se encuentren actualmente las más graves contradicciones, de muy diversos orígenes. Estas producen en la gran mayoría una sensación de grave frustración e insatisfacción que no siempre se concreta en una determinada toma de postura, pero que – no cabe duda – provoca un estado de ánimo propicio a poner en revisión no sólo las promesas recibidas durante su formación, sino también los supuestos generales en que se funda el ejercicio profesional”. Pero concluía: “ Nuestros ingenieros – cada vez más cerca de técnicas universales y comunes-, cada vez más comprometidos con la realidad, podrían prestar en el futuro una contribución inmensa a nuestro país, paralela en entusiasmo a la de aquellos que nos precedieron en el siglo pasado, que tuvieron que luchar individualmente por el progreso, y no pocas veces en condiciones trágicas”.

Llegados a este punto, y para no cansar más al lector que haya tenido la paciencia de llegar hasta aquí, mi conclusión es que el abanico de actividades del ingeniero no tienes más límites que su sólida preparación científica, su talento y su vocación. No esperen Vds., por tanto, que liste una relación de actividades en las que el ingeniero pueda aportar valor. No lo creo posible. Sería un ejercicio reduccionista. ¿Es posible limitar, a igualdad de conocimiento técnico y científico, el talento y voluntad de alguien?.

Existen, no obstante, estudios del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos sobre sectores profesionales, que tienen un exclusivo interés estadístico. Así en la Memoria Anual 2013 se indica que el 10% de los ingenieros trabajan en la Administración (Administración Central, Autónoma y Local y Entidades dependientes), 2% en docencia y educación, 24% en construcción y empresas auxiliares, el 25% en empresas consultoras y en ejercicio libre, el 2% en empresas de transporte, comunicación y nuevas tecnologías, el 3% en empresas de energía, agua y medio ambiente, el 25% en organismos internacionales y actividades varias y el 8 % jubilados. Resulta destacable el alto porcentaje de ingenieros en organismos internacionales- los menos- y actividades varias – los más-.

Lo que sí es posible, es recordar una serie de actividades que requieren el uso de tecnologías y que constituyen prioridades en la Sociedad en la que vivimos, en un mundo globalizado- la internacionalización de nuestras capacidades ingenieriles se presenta como un reto en el que España está muy bien posicionado-. Dichas actividades están vinculadas con la planificación, proyecto, construcción, conservación

y mantenimiento y explotación de las obras públicas (carreteras, ferrocarriles, puertos y aeropuertos, obras hidráulicas, etc.), así como la gestión de los servicios de transportes- no sólo de creación de infraestructura-. Por supuesto, en esta lista hay que incluir las actividades relacionadas con la economía sostenible, el medio ambiente y el cambio climático, las costas y el medio marino, la energía, el agua, así como las actividades vinculadas con la ciudad sostenible, el urbanismo, el estudio y recuperación del patrimonio histórico, el paisaje, la organización de empresas y actividades en general.

Mención especial merece las actividades de innovación tecnológica. A veces se oyen voces que sostienen que el sector de la ingeniería civil es un sector maduro que requiere pocos esfuerzos adicionales de investigación e innovación. Ignora dicha afirmación las necesidades cada vez mayores de innovación, en materiales, tipos estructurales, procesos de ejecución, mejora en sus impactos ambientales, análisis de su vida útil y de riesgos, de acomodación al paisaje o conformación del paisaje, adaptación del patrimonio de los construido a otros usos, etc.

Recientemente el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX realizó un estudio sobre la evolución de puentes grandes luces – el puente en el Estrecho de Mesina se ha proyectado con una luz del vano principal de 3.300 m, que contrasta con el Golden Gate, por ejemplo, que tiene una luz en el vano principal de “tan solo” 1280m - en el que se explica cómo estos nuevos retos han dado lugar, por ejemplo, a la introducción de grandes desarrollos tecnológicos en materiales: en hormigones de densidad normal, ligeros y ultrarresistentes, en aceros de pretensado, en cables de sustentación, en el acero estructural y de alta resistencia y con resistencia mejorada a la corrosión marina, en aceros inoxidable, etc. Con este ejemplo creo que queda claro que ni siquiera en una actividad tradicional de la ingeniería como la construcción de puentes, se puede prescindir de la innovación. Por otro lado, salvo en épocas de estancamiento económico y cultural, a lo largo de nuestra historia siempre la innovación ha estado presente en la ingeniería.

En fin, la ingeniería y, por tanto, los actores de la misma, tienen que adaptarse a la realidad y a las condiciones del contexto en que ésta se ha de desarrollar – siempre ha ocurrido así – y ese es el mérito y capacidad de nuestra profesión para seguir sirviendo a la Sociedad a la que pertenecemos y de la que formamos parte.





EL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE LA COMUNIDAD DE MADRID: UN MODELO EXPORTABLE

Dionisio González

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
CONSORCIO REGIONAL DE TRANSPORTES DE MADRID

La Comunidad de Madrid cuenta con uno de los mejores sistemas de transporte público del mundo, cuya integración permite prestar unos servicios cada vez más rápidos y eficaces, aumentando la calidad de vida de los madrileños y la competitividad de la región en términos de actividad económica.

El Consorcio Regional de Transportes de Madrid se constituyó en 1985, como un instrumento destinado a unificar, homogeneizar y coordinar los servicios de los distintos modos de transporte existentes en la Comunidad de Madrid.

Desde entonces, además de llevar adelante esta función esencial para la vertebración de un auténtico sistema integral de transporte público, el Consorcio de Transportes se ha consolidado también como el órgano esencial de planificación de la red, constituyendo en la actualidad un modelo y referente para muchas otras autoridades de transporte público.

Intercambiador de Getafe Central.



Apoyándose en este modelo integrado, el Gobierno de la Comunidad de Madrid ha podido llevar a cabo en los últimos años ambiciosos Planes de Infraestructuras, que, entre otras acciones, han supuesto la mayor ampliación de la historia en cualquier metro del mundo (desde 1995, 172 km y 136 nuevas estaciones), 36 km de la nueva red de metros ligeros, la construcción de modernos intercambiadores, la renovación permanente del material móvil, la introducción de la billética inteligente y la puesta en marcha de un Centro de Gestión desde el que se supervisan en tiempo real la explotación de los más de 40 operadores públicos y privados que componen el sistema de transporte de la Comunidad de Madrid.

Plaza Castilla. Vista aérea del intercambiador de superficie.



El número total de viajes en la Comunidad de Madrid durante un día laborable es de 15 millones, un ratio de 2,5 viajes por habitante. Estos viajes se reparten con un cierto equilibrio entre los tres grandes modos: un 35% en transporte público, un 34,8% en vehículo privado y el resto andando, posicionando a la Comunidad de Madrid como líder en uso del transporte público en comparación con otras grandes capitales europeas (Londres, Berlín, París, etc).

En cuanto al motivo de viaje, el mayor peso corresponde a la movilidad obligada, en primer lugar por motivo trabajo, 37,1%, seguido del motivo estudio, 19,3%. La movilidad no obligada tiene un peso total del 43,6%, lo cual implica que cada día son más diversos los motivos por los que la gente se desplaza y, en consecuencia, la movilidad es más compleja.

La movilidad por ámbitos espaciales presenta diferencias notables:

- Movilidad dentro del municipio de Madrid: el transporte público es predominante canalizando el 64% de la movilidad.
- Movilidad radial entre el municipio de Madrid y la corona metropolitana: en este caso existe un equilibrio entre transporte público y vehículo privado.
- Movilidad entre municipios del resto de la Comunidad: dos terceras partes de los viajes se hacen en vehículo privado.

El transporte público en la región de Madrid constituye un sistema complejo de carácter intermodal, en el que participan una pluralidad de modos de transporte. Se pueden distinguir dos grandes subsistemas:

- Ámbito urbano de la ciudad de Madrid: alrededor de 200 líneas de autobús urbano (EMT), 12 líneas de metro, 1 línea de metro ligero y 31 estaciones de ferrocarril de Cercanías.
- Ámbito metropolitano de la región: un centenar de líneas urbanas de autobús, más de 300 líneas interurbanas, 5 líneas de metro, 3 líneas de metro ligero y 8 líneas de ferrocarril de Cercanías.

Ambos subsistemas se articulan mediante un conjunto de grandes intercambiadores que circundan el área central de la ciudad de Madrid, canalizando la movilidad radial entre la corona metropolitana y la capital.

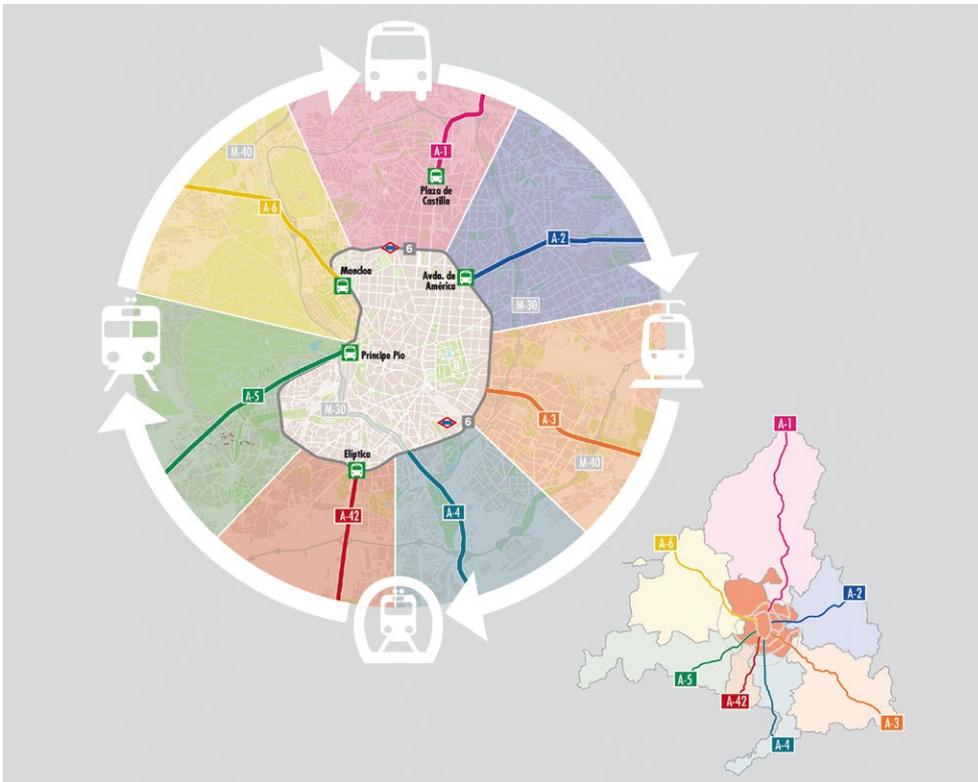
El sistema cuenta con distintas empresas operadoras, públicas y privadas:

- Metro de Madrid, S.A., empresa pública propiedad de la Comunidad de Madrid.
- EMT, empresa municipal del Ayuntamiento de Madrid, que opera de las líneas urbanas en el municipio de Madrid.
- EMT, empresa municipal del Ayuntamiento de Madrid, que opera de las líneas urbanas en el municipio de Madrid.
- 31 Empresas privadas que operan las líneas de autobús interurbano y líneas urbanas en las coronas B y C.
- Cercanías Renfe, empresa pública dependiente del Ministerio de Fomento, operador de las líneas de ferrocarril suburbano.
- La sociedad Transportes Ferroviarios de Madrid (TFM), concesionaria de la prolongación de la línea 9 de Metro a Arganda del Rey.

CITRAM, Centro Integral de Gestión de Transporte Público.



Anillo de intercambiadores en los principales accesos a la ciudad.



- La sociedad MetroBarajas, S.A. concesionaria de la conexión con la terminal T-4 del aeropuerto.
- Las 3 concesionarias de las líneas de Metro Ligero: Metro Ligero Oeste S.A., Metros Ligeros de Madrid S.A. y Tranvía de Parla S.A.
- Las 5 sociedades que explotan los intercambiadores de transporte de la Región, por los que transitan 1 millón de personas/día.

La demanda anual de transporte público alcanza casi 1.400 millones de viajes, que representa una media de 225 viajes-año/habitante, cifra muy destacada, fruto del esfuerzo inversor realizado por la Comunidad de Madrid en los últimos años y de la buena gestión del conjunto de actores implicados en la movilidad (operadores, empresas concesionarias, constructoras, proveedores de material móvil, etc.), que con sus equipos técnicos y profesionales han convertido el sistema de transporte público en un referente mundial.

Este modelo ha sabido adaptarse, sin duda, a las circunstancias de cada momento, buscando también fórmulas novedosas en la financiación de infraestructuras y servicios mediante la colaboración público-privada, más allá de la provisión de las mismas vía inversión directa de las Administraciones Públicas.

Toda esta experiencia acumulada ha facilitado las posibilidades de exportación del modelo integrado, objeto de numerosas visitas y trabajos de asesoramiento a Administraciones Públicas y empresas de todo el mundo, como refleja el siguiente gráfico:





Lima (Servicio operado por la EMT).



Quito. Proyecto de línea 1 de Metro (realizado por Metro de Madrid).

Además del marco institucional de la autoridad de transportes, la gran experiencia de los operadores ha sido objeto de atención por los responsables de movilidad de todos las partes del mundo:

- Así, Metro de Madrid, ha estado y está presente en multitud de proyectos en el exterior: Santiago de Chile (Chile), Quito (Ecuador), Lima (Perú), Dublín (Irlanda), Santo Domingo (República Dominicana), Buenos Aires (Argentina), Londres (Reino Unido), etc.
- La Empresa Municipal de Transportes de Madrid ha puesto en valor su experiencia en Lima (Perú), Addis Abeba (Etiopía), Bursa (Turquía), Kyzylbrza (Kazajistán), Mendoza (Argentina), La Paz (Bolivia) y Bogotá (Colombia), entre otras ciudades.
- Empresas globales como ALSA, perteneciente al grupo británico National Express, o Arriva, compañía perteneciente a la Deutsche Bahn, han ganado concursos y están prestando servicios de movilidad a nivel global (Reino Unido, Estados Unidos, Canadá, Italia, Alemania, Portugal, Marruecos, China, ...)
- Sin olvidar, el papel fundamental que los grandes grupos concesionarios de nuestro país juegan a nivel global, no sólo por su solidez técnica, sino por la habilidad y capacidad de gestión de proyectos complejos, como han sido los desarrollados en los últimos años en el ámbito del transporte en la Comunidad de Madrid.

71

Agradecimientos

En esta ponencia se ha tratado de presentar sucintamente el modelo de provisión de infraestructuras y servicios de transporte público de la Comunidad de Madrid, realidad exportable de gran éxito, gracias al fantástico trabajo de operadores, concesionarios, Administraciones, etc. Todos ellos han contribuido a la redacción e ilustración de estos párrafos.

Créditos

Exposición

Comisario de la muestra

José A. Martín-Caro Álamo

Organización

Demarcación de Madrid del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Participantes

Jose A. Martín-Caro

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
INES Ingenieros Consultores*

César Lanza

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Tecnova*

Manuel Elices

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Ciencia de Materiales
ETSI Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid*

Gustavo Guinea

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Ciencia de Materiales
ETSI Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid*

Ignacio Calvo

*Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
Innovación Tecnológica de ACCIONA Infraestructuras*

María Pilar Górriz

*Dra. Ciencias Químicas
Innovación Tecnológica de ACCIONA Infraestructuras*

Gonzalo Arias Hofman

*Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
INES Ingenieros Consultores*

Mariano Navas

*Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Centro de Estudios y Experimentación
de Obras Públicas
CEDEX-Ministerio de Fomento*

Dionisio González

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
CONSORCIO REGIONAL
DE TRANSPORTES DE MADRID*

Entidades colaboradoras

Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF)
Arenas y Asociados
Asociación de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Carlos Fernández Casado Oficina de Proyecto
Consortio Regional de Transportes de Madrid (CRTM)
Desarrollo Urbanístico Chamartín, S.A. (DUCH)
DRAGADOS-FPS
Escuela Técnica Superior de Caminos,
Canales y Puertos de Madrid
FCC-Conduril
Iberdrola
INES Ingenieros Consultores
Metro de Madrid
Mº de Fomento
OHL
Real Madrid
Tecnova

Diseño y montaje

NYMAR WOOD, S.L.

Maquetación catálogo

Mary Ortega. Gráfica.

Edita e imprime

Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica
Ministerio de Fomento ©

Entidades Colaboradoras:



74

Acuerdos corporativos:



Patrocinadores:



Colaboradores:

