

DISCURSO PRONUNCIADO  
POR EL NUEVO DOCTOR  
D. ENRIQUE ALARCÓN

*Excmo. Sr. Rector Magnífico*  
*Excmas. e Imas. autoridades*  
*Miembros del Claustro Universitario*  
*Señoras y señores*

QUIERO empezar agradeciendo a la Universidad de Zaragoza y en particular al Departamento de Ingeniería Mecánica el honor que me hacen al otorgarme el grado de doctor en este prestigioso centro de estudio e investigación, aunque he de reconocer que la distinción podría deberse, más que a los propios méritos, al sentimiento de amistad con que me distinguen algunos de mis primeros discípulos y colaboradores que hoy lideran la investigación española en el área de la Mecánica de los Medios Continuos. Me refiero en particular al profesor Manuel Doblaré, al que conozco desde 1976 cuando él era un estudiante destacadísimo en los cursos que yo dictaba por entonces en la ETS de Ingenieros Industriales de la Universidad de Sevilla.

Recuerdo cómo me impresionaron su inmensa capacidad de trabajo, su curiosidad inacabable, su inteligencia y su creatividad, que me hicieron proponerle al finalizar el curso la incorporación al grupo de personas con las que inicié mi aventura como profesor universitario. A lo largo de los años que

estuvimos juntos (y no fueron tantos, pues desde el principio procuré animarle a que viajara a universidades extranjeras para calibrar su capacidad frente a investigadores internacionales), demostró que aquellas virtudes juveniles no dejaban de crecer, así como una excepcional capacidad para crear un ambiente de cooperación y cordialidad con el resto de investigadores del grupo. No es casualidad que los años en que mi propia producción científica fue más alta o aquellos que recuerdo con mayor cohesión y cordialidad en mi cátedra coincidan con la presencia del profesor Doblaré. Sin ella no habría sido posible casi nada de lo que se consiguió, y por ello mi historia como investigador está en deuda con él.

Su venida a Zaragoza supuso una pérdida indudable para nosotros y una bendición providencial para la recién creada ETSII de la Universidad de Zaragoza, que se encontró con una persona capaz de vencer los rozamientos iniciales que se oponen al arranque de cualquier iniciativa. Desde entonces he mantenido contactos periódicos con él y los miembros de su grupo en tesis doctorales, conferencias e iniciativas comunes que marcan nuestra actividad científica como profesores, pero también hemos colaborado en algunos proyectos de investigación aplicada, como cuando desarrollamos el estudio de la propagación de ondas provocadas por el corte de origen pirotécnico que marca la separación de las fases en el cohete Ariane V. Este estudio lo llevamos a cabo en la Sociedad de Investigación, Estudios y Experimentación (SINEX, S. A.), que yo había fundado en 1988 para intentar facilitar a la industria algunas de las técnicas modernas que habíamos puesto a punto en la Universidad y que eran prácticamente desconocidas en nuestro país.

Me permitirán en este momento alguna digresión sobre mi propia historia para justificar el tema y contenido de mi charla. Cuando se mira hacia el pasado, se tiene la sensación de que todas las actividades se ordenan armoniosamente y que conducen a una trayectoria vital que no podía ser otra. Que *natura non facit saltus* sea un axioma proclamado por un profesor de mecánica de los medios continuos parecería algo obligado. Pero, como se sabe desde principios del siglo XX y se han encargado de demostrar científicos como Planck o visionarios como Velikovsky, lo que hace la naturaleza es no parar de dar saltos. Y en forma análoga, cuando se recuerda con más detalle, se observa que la trayectoria personal está llena de dudas y discontinuidades.

Una serie de circunstancias fortuitas, de las que sólo recuerdo como deliberada la decisión de probar mi capacidad ante un desafío intelectual de primer orden, me llevaron a estudiar la carrera de Ingeniero de Caminos. Al terminar en 1966, lo único que yo deseaba era proyectar y construir obras y tuve la fortuna de conseguirlo, con una libertad de acción inesperada, al entrar a trabajar como ingeniero en la Subdirección de Estudios y Obras Nuevas de Renfe, donde estuve hasta 1974.

El trabajo tenía aspectos muy interesantes: debíamos dirigir la construcción de las obras que habíamos proyectado (lo que inexorablemente nos colocaba ante nuestros propios fallos); obras que se referían a todos los temas de nuestra profesión (construcción, estructuras, mecánica del suelo, etc.) y que, finalmente, podían producirse en cualquier punto de España, lo que para una persona joven y deseosa de conocer su país no dejaba de ser un atractivo. De aquella época quedan en pie todavía algunos de mis proyectos en la estación de Calatayud.

Pero además debíamos preparar informes y buscar soluciones a los numerosos problemas que aparecen en una red de ferrocarriles. En particular, debíamos ensayar los puentes metálicos antiguos para ver su necesidad de refuerzo ante los incrementos de carga y velocidad. Y aquí está el origen de mi primer cambio hacia el mundo de la investigación. Recuerdo la impresión que me produjo el ensayo que me encargaron de un puente en las proximidades de Ariza y en el que había dudas de su respuesta dinámica.

Las dificultades de interpretación de los registros, obtenidos con extensómetros mecánicos mientras las locomotoras de prueba se paseaban sobre el tablero, llevaron a mi tesis doctoral sobre efectos dinámicos en puentes de ferrocarril, dirigida por el profesor Juan Batanero y apoyada por los conocimientos del profesor Miguel Á. Hacar, cuya categoría científica y humana, aunque inalcanzable para mí, siempre he intentado emular.

El esfuerzo personal fue tremendo, y a esta distancia no comprendo de dónde sacaba el tiempo para mantener un alto rendimiento en Renfe, dar clase en las Escuelas de Caminos y Obras Públicas, hacer la licenciatura en Física, terminar la tesis, organizar cursos de posgrado sobre dinámica, escribir cuatro libros, y... tener cuatro hijos. (La plantación de los cuatro árboles necesarios para completar el axioma tuvo, sin embargo, que esperar diez años.)

Recordarán que en aquella época empezó la revolución de los ordenadores y el desarrollo de métodos de cálculo como los elementos finitos, algoritmos como la transformada rápida de Fourier, había problemas ingenieriles tremendos, como la construcción de centrales nucleares, y comenzaba la comprensión de los fundamentos de la ingeniería sísmica. Desde 1966 hasta 1970, fecha en la que defendí la tesis, intenté asimilar el volumen de información que en forma de artículos y libros me llegaba sobre el tema central de aquélla: la dinámica de estructuras. De 1970 a 1974 vi claramente que tendría que elegir entre ser un buen proyectista o enterarme realmente de lo que estaba pasando en el mundo.

De nuevo se produjo un hecho inesperado: la fundación de la Escuela de Caminos en Barcelona y la invitación a sumarme a ella como profesor. En 1974 corté mi estancia en Renfe e inicié un periplo que, por una serie de circunstancias absolutamente fortuitas también, me llevó a pasar un año en Barcelona, dos en Sevilla como catedrático numerario para volver finalmente a Madrid en 1977 pero en la ETS de Ingenieros Industriales.

Fue una época de actividad intensísima, acompañado ahora por un grupo de personas que compartían los mismos ideales. Descubrimos una línea de trabajo, viajamos continuamente al extranjero y publicamos en revistas prestigiosas todo lo que éramos capaces de escribir... ¡que era mucho! Baste decir que en el año 1981 se defendieron nada menos que cinco tesis doctorales, entre ellas la del profesor Doblaré.

En 1988 se produjo otro salto en mi trayectoria. La construcción de unos túneles en Asturias y mi deseo de traspasar lo que habíamos aprendido a la ingeniería práctica provocaron la creación de SINEX, a la que me he referido más arriba, y el descubrimiento casual de un campo de investigación: la seguridad frente a incendios en túneles, donde empezamos a trabajar basándonos en nuestra capacidad con métodos numéricos. Esta línea ha dado lugar a cuatro tesis doctorales y a la creación de un equipo de jóvenes investigadores con el que estamos apoyando la construcción de estas importantes infraestructuras, así como el desarrollo de normas de buena práctica para su seguridad.

Y precisamente sobre este tema va a versar mi charla, cuya moraleja final es la conveniencia de armonizar el trabajo de las administraciones, la industria y las universidades.

Las infraestructuras se construyen como respuesta a un problema social buscando el desarrollo de la comunidad. Generalmente, su éxito es tal que crecen continuamente, tienen una gran proyección en la ordenación del territorio, se hacen imprescindibles y a menudo funcionan de acuerdo con las expectativas, lo que hace que su fallo ocasional provoque la exasperación del usuario. Se trata, normalmente, de accidentes con muy baja probabilidad de ocurrencia, para los que el enfoque del ingeniero acerca del riesgo —entendido como combinación de peligrosidad de la acción, vulnerabilidad de la estructura y coste global— presenta dificultades de aplicación. Por ello, el riesgo se suele plantear desde un punto de vista subjetivo, o sociológico, con todas las dificultades que conlleva hablar de su aceptabilidad.

Éste es precisamente el caso de los incendios en túneles de carretera, cuyo riesgo objetivo puede calibrarse pensando que la estadística de muertes en *todo* el mundo durante *todo* el siglo XX, incluyendo los terribles accidentes de Mont Blanc, Tauern y San Gotardo, no superan las 120 personas, cifra comparable al de fallecidos en accidente de carretera en cualquier fin de semana en nuestro país.

La alarma social generada por estos hechos pone de manifiesto el aspecto subjetivo al que me refería más arriba, pero también la conveniencia de revisar los conocimientos de que se dispone.

En ingeniería, ello se consigue siguiendo el método de la ciencia positiva, es decir, observando las particularidades de los fenómenos, intentando reproducirlos en condiciones controladas, interpretando los resultados mediante modelos numéricos basados en las leyes de la ciencia y adoptando medidas para corregir los puntos débiles de los proyectos. Cuando se llega a un paradigma aceptado, el conocimiento se transforma en una normativa de obligado cumplimiento que recoge las condiciones mínimas que deben cumplir los proyectos y las construcciones.

La responsabilidad en este complejo panorama se reparte entre los estudiosos de las universidades y otros organismos de investigación, los constructores y la industria en general, que llevan a cabo el proyecto y la ejecución de las obras, y los ingenieros de la Administración, que son los encargados de producir la normativa y velar por la competencia equitativa entre los industriales.

En el caso concreto de la seguridad frente a incendios en los túneles, este último paso tiene un carácter internacional, y, aunque generalmente se ha llevado a través de organismos privados como la Asociación Internacional de la Carretera (PIARC), los últimos accidentes han provocado la actuación de la ONU y de la Unión Europea, que ha emitido recientemente una directiva que afecta no sólo a los detalles constructivos de la infraestructura sino también a la organización de la explotación, a la seguridad de los vehículos y a la educación de los usuarios en una cultura de autoprotección actualmente inexistente.

Desde el punto de vista científico, posiblemente el aspecto más atrayente sea el diseño de un sistema de ventilación que permita controlar el movimiento de los humos producidos durante el incendio y que, dejados sin intervención, oscilan de forma aleatoria ante los cambios de presión entre bocas, la evolución del tráfico o el efecto chimenea que se genera en los túneles con altas pendientes por la diferencia de temperaturas.

Generalmente, se dispone de máquinas capaces de impulsar o absorber los humos de forma controlada. Pero ello implica en primer lugar la existencia de *detectores* del lugar en que se produce el incendio, de anemómetros capaces de registrar la velocidad del aire, de opacímetros que ayuden a fijar la posición del humo en cada momento, etc. Estas señales deben ser transmitida a un *centro de control*, donde son analizadas y desde donde se imparten las órdenes de actuación sobre los ventiladores y exutorios capaces de controlar el flujo de humos. Se dice que el proceso tiene dos etapas: una, muy corta, de salvamento de los usuarios que se extiende durante los primeros 15 minutos, en que son fundamentales las medidas de autoprotección tanto del túnel como de los pasajeros; y otra posterior, en que el objetivo es reducir los daños en la infraestructura.

Debido al corto tiempo disponible, el centro de control debe tener preparadas unas *pautas de actuación* programadas en ordenador, de modo que el operario sólo deba comprobar la veracidad de la alarma y autorizar el desencadenamiento de las medidas. Se presentan con ello interesantísimos problemas de *identificación y control*, que por el momento se están resolviendo mediante técnicas de conjuntos borrosos.

Antes, sin embargo, de llegar al proyecto se suele recurrir a *modelos físicos y numéricos* en que se experimentan las soluciones. Hasta ahora los modelos físicos han respondido a dos tipos: maquetas en laboratorio y

ensayos en túneles abandonados. En el primer caso se recurre a las leyes de semejanza para ajustar dimensiones y densidades de los fluidos involucrados; tienen el inconveniente de la imposibilidad de ajustar todos los números característicos necesarios para una semejanza perfecta y la ventaja de poder controlar de forma estricta las particularidades del ensayo. Dentro de la incertidumbre global que rodea el fenómeno estos métodos han permitido fijar criterios sobre posicionamiento de los exutorios, caudal extraído, etc.

En el otro extremo se encuentran los *ensayos en túneles abandonados* que se preparan explícitamente para ello. Aquí la escala no es problema, ni desde el punto de vista geométrico ni de la selección del incendio, que puede ser tanto un vehículo real como un foco simulado mediante una sartén de heptano o fuel-oil. Sin embargo, las condiciones naturales de contrapresión o velocidad en las bocas son difíciles de controlar. Los ensayos más famosos en Europa fueron realizados en un antiguo túnel minero cerca del cabo Norte, el Repparfjord, y en EE. UU. los del Memorial, en un túnel de carretera abandonado cerca de Virginia. Además de proveer resultados científicos, estos ensayos permiten probar técnicas de comprobación de tipo admonitorio para llevar a cabo en *túneles recién terminados* y garantizar que todos los equipos involucrados funcionan correctamente.

Finalmente, los avances en los métodos de cálculo y en el desarrollo de la capacidad y velocidad de proceso de los nuevos ordenadores ha permitido modelar los complejos fenómenos de combustión, transferencia térmica y generación de contaminantes que se producen durante un incendio, y llevar a cabo estudios paramétricos muy extensos como soporte tanto de las previsiones de proyecto como de las pautas de actuación que deben seguirse.

Desde el punto de vista del *proceso constructivo*, se han incrementado los controles de calidad, no ya de los elementos por separado sino del conjunto formado por las máquinas y la obra civil, que forma un sistema donde el fallo repercute en ambas estructuras.

Puede verse que un túnel es un sistema complejísimo que no subsiste si no se mantiene de forma permanente, como si se tratase de una inmensa máquina, llena de artefactos multidisciplinares, cuya misión es producir tráfico seguro.

Yo he tenido la gran suerte de participar en el equipo que ha llevado a cabo la construcción del túnel más importante de España, el de Somport, que con sus 8,5 km y su carácter internacional ha supuesto un desafío intelectual, de voluntad y de ingenio tanto durante el proyecto como durante la construcción. Aquí se ha puesto de manifiesto la necesidad de armonizar todas las especialidades implicadas en la obra y la diferente forma de pensar de los equipos de distinto origen. Como es imposible citar a todas las personas que han dedicado su tiempo a sacar adelante este prodigio técnico, me van a permitir que represente a todos ellos en la persona del ingeniero del Ministerio de Fomento D. Rafael López Guarga. Sólo el tesón, inteligencia y *savoir faire* de López Guarga han permitido cohesionar un equipo tan variado y sacar adelante un empeño que no siempre ha recibido de nuestros colegas transpirenaicos la correspondencia de esfuerzo y entusiasmo que necesitábamos. Si bien, todo hay que decirlo, ello ha supuesto un complemento de motivación para todos los técnicos españoles.

Finalmente, se podría indicar que un problema remanente es reacondicionar los túneles existentes para que su seguridad alcance cotas semejantes a las de los nuevos. Tanto el propio Ministerio de Fomento como las administraciones locales y autonómicas se están viendo involucradas en ello, y de nuevo deseo expresar el honor que me supone estar colaborando en el estudio para el reacondicionamiento del túnel de Monrepós, cuyo proyecto se ha entregado en fechas recientes.

Con este tema he intentado describirles cómo se armonizan los esfuerzos de investigación y desarrollo en un problema de ingeniería que afecta desde los organismos de toma de decisión hasta los centros de estudio. De hecho, como la seguridad es de interés social, provoca decisiones políticas, y éstas afectan directamente a la organización de la profesión.

No cabe duda de que la implantación de la directiva europea va a plantear exigencias de tecnificación y organización del trabajo en infraestructuras, así como una clarificación de responsabilidades de los diferentes organismos que participan.

Yo creo que todo ello es positivo, pues va a producir no sólo una mejora de la seguridad global sino también una cultura de prevención y autoprotección en los usuarios.



Finalmente, para los universitarios significará la apertura de nuevas líneas de investigación y, por tanto, la actualización de los conocimientos transmitidos, que son los dos motivos justificativos de la existencia de cualquier universidad que se precie.

Enrique Alarcón Álvarez