



RASC

Real Academia
Sevillana de Ciencias

Un modelo integral en la ingeniería de estructuras

discurso pronunciado por el

Excmo. Sr. D.

José Domínguez Abascal

en el acto de recepción como académico numerario

el día 9 de abril de 2002

y

contestación del académico numerario

Excmo. Sr. D.

Javier Aracil Santoja

UN MODELO INTEGRAL EN LA INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS

*Discurso pronunciado por el
Excmo. Sr. D. JOSÉ DOMÍNGUEZ ABASCAL,
en el Acto de su recepción como Académico Numerario
celebrado el día 9 de abril de 2002*

Excmos. Srs.

La Real Academia Sevillana de Ciencias me eligió como uno de sus miembros en virtud de unos méritos que, obviamente, no me corresponde confirmar ni poner en duda, limitándome sólo a relativizarlos. En mi vida académica sólo traté de seguir el camino que me marcaron mis mayores: mis padres, mis hermanos y mis maestros; en particular Enrique Alarcón, Carlos Brebía, José Roesset y Javier Aracil. Aún desde la torpeza, el seguir a estas personas debiera producir algunos buenos resultados.

Me gusta comparar el desarrollo de la ciencia y la técnica con algo grandioso y propio de mi oficio de ingeniero de estructuras: la construcción de una gran obra de piedra. A mis maestros que me enseñaron como había que preparar y colocar las piedras, y a mis alumnos y discípulos que, siendo más fuertes que yo, las colocan conmigo cada día, muchas gracias.

Quiero hacerles llegar desde el principio la forma gozosa y agradecida de estas palabras de presentación ante la Academia. Gozosa, porque declara la íntima complacencia con que recibo la distinción de ser admitido en esta ilustre y noble institución, y poder soñar con la idea de merecer algún día el título de científico. Agradecida, porque sólo puedo sentir gratitud hacia quienes generosamente me eligieron. En especial, a los académicos que forman la Sección de Tecnología: Javier Aracil, José Luis de Justo y José Luis Manzanares, que me propusieron.

Como es costumbre en estas circunstancias, me gustaría decir unas palabras sobre un tema de mi especialidad al que he dedicado mis estudios. Más adelante haré algunas consideraciones sobre la necesaria relación entre Ciencia e Ingeniería. He titulado mi intervención: "Un modelo integral en la Ingeniería de Estructuras".

Entiendo aquí por modelos integrales, modelos numéricos basados en ecuaciones integrales de contorno. Empleamos estos modelos para el estudio del comportamiento mecánico de sólidos y fluidos.

Me referiré en la mayoría de las ocasiones a los sólidos, que han formado principalmente el campo de mi actividad. En los sólidos me referiré a su comportamiento

resistente, a su comportamiento como estructura, a su capacidad para resistir cargas manteniendo la forma con alteraciones dentro de límites aceptables. Sólidos tan dispares como un tornillo, una presa de tipo bóveda o el álabe de una turbina tienen en común que deben mantener su forma ante las cargas exteriores.

En la mayoría de las situaciones todas las cargas significativas están aplicadas en la superficie que, a su vez, definen totalmente la geometría del cuerpo. Es pues razonable que si el sólido es homogéneo y conocemos unas constantes que determinan el comportamiento del material, seamos capaces de obtener toda la información del interior con sólo modelar la superficie. Si la superficie contiene toda la información geométrica y de cargas, ¿porqué habríamos de definir explícitamente el interior? ¿Porqué hemos de discretizarlo mediante Elementos Finitos o Diferencias Finitas para su estudio?

Esta idea simple es la que nos fascinó a muchos en los años 70 cuando los Elementos Finitos y las grandes discretizaciones de dominio permitían ya resolver numéricamente un sinnúmero de problemas estructurales.

La formulación matemática vino de la mano de la escuela italiana de finales del siglo XIX. Betti había dado a conocer su teorema de reciprocidad en 1872 y Castigliano, siete años más tarde, su procedimiento para calcular los desplazamientos en cualquier punto de una estructura de barras partiendo de la solución básica correspondiente a una carga unidad.

Empleando el teorema de Betti y la idea de Castigliano, Somigliana obtuvo en 1898 la expresión del desplazamiento en cualquier punto interno de un sólido elástico como integral ponderada de las fuerzas y desplazamientos sobre su contorno.

Para ello necesitó de una solución fundamental debida a una carga puntual unitaria. La de Kelvin, correspondiente al medio elástico Infinito fue la ideal por su sencillez y universalidad. Todo sólido puede imaginarse como parte de un medio Infinito del mismo material.

De forma paralela, podía obtenerse el valor de un potencial escalar en un punto de un dominio en términos de potencial y flujo en el contorno, partiendo del segundo teorema de Green y la solución del problema de una fuente puntual unitaria en una región Infinita.

La capacidad de obtener el desplazamiento y sus derivadas en cualquier punto del interior no revolvía del todo las cosas, ya que en cualquier problema bien definido de la mecánica de sólidos, para cada punto y dirección sobre el contorno se conoce bien el desplazamiento o bien la proyección de la tensión (presión o tracción), pero no ambas. Debía pues resolverse previamente el problema de contorno.

Transcurrieron más de sesenta años hasta que en 1963 Jaswon, Ponter y Symm, trabajando sobre el problema del potencial escalar, resolvieron el paso al límite para llevar el punto de aplicación de la fuente concentrada a la superficie. Así, la representación matemática del potencial en un punto, ahora sobre el contorno, en función del potencial y el flujo en la superficie pasó a ser una ecuación integral sobre el contorno que relacionaba ambas variables y que, dadas las condiciones de contorno, podía ser resuelta numéricamente mediante discretización. De este modo quedaba resuelto el problema de contorno.

Rizzo en 1967 extendió las ideas del paso al límite y la discretización del contorno al problema elástico. No es casual que este proceso que conduce a un sistema de ecuaciones con un número significativo de incógnitas se produjera en un momento en que ya era posible su resolución en un ordenador.

Tuve la ocasión de entrar en contacto con la formulación integral de los problemas elástico y de potencial a mediados de los setenta en Inglaterra, donde pasaba unos meses como becario de doctorado visitante. El método numérico derivado de aquella formulación fue allí bautizado como "Boundary Element Method" en la primavera de 1977. Dado lo poco relevante del método en aquel momento el grupo únicamente estaba formado por el Profesor Batterfield, los Lecturers Banerjee y Brebia, y quien les habla.

Las demoras propias de los procesos de publicación hicieron que la primera vez que el nombre apareció en la bibliografía fuera en español (Método de los Elementos de Contorno). Fue concretamente, en mi Tesis Doctoral leída en la Universidad de Sevilla en Julio de 1977. A finales de ese mismo año apareció ya el nombre en inglés en las actas de un congreso celebrado en Alemania y en un artículo de la revista *Applied Mathematical Modeling* del que fui uno de sus firmantes. Desde entonces varios miles de artículos y comunicaciones sobre el Método de los Elementos de Contorno han aparecido en revistas y actas de congresos celebrados en todo el mundo.

España ha ocupado un lugar destacado en el desarrollo de esta herramienta numérica, fundamentalmente a través de la escuela que fundó y ha hecho crecer durante años, primero desde Sevilla y luego desde Madrid, Enrique Alarcón, bajo cuya dirección tuve el privilegio de realizar la Tesis Doctoral.

El modelo integral mediante Elementos de Contorno se ha extendido a numerosos campos de la mecánica de medios continuos. Se han desarrollado formulaciones para sólidos y fluidos. Para problemas de transmisión de calor y de electromagnetismo, entre otros. En el caso de los sólidos disponemos de formulaciones para medios elásticos, plásticos, viscoelásticos y poroelásticos saturados. Formulaciones para el problema termoelástico y para los de propagación de ondas.

El modelo numérico integral requiere, para cualquier tipo de problemas, cuatro ingredientes fundamentales:

Primero, una ecuación de reciprocidad que es normalmente obtenido de consideraciones energéticas o mediante una formulación débil a partir de una ecuación de residuos ponderados.

Segundo, una solución fundamental correspondiente a una fuente puntual unitaria de tipo estático o dinámico.

Tercero, un proceso de paso al límite hacia el contorno que conlleva la integración de las singularidades producidas sobre la superficie en el punto de colocación de la fuente.

Y, cuarto, una discretización de la superficie en elementos sobre los que se realiza una aproximación de las variables mediante sus valores nodales y funciones de pequeño soporte.

Las ventajas de los modelos integrales (Elementos de Contorno) sobre los de dominio (Elementos Finitos) son claras a primera vista. La dimensión del problema disminuye en una unidad y, por lo tanto, la dificultad de discretización y el número de incógnitas se reduce sensiblemente. Donde antes había que discretizar un dominio ahora sólo hay que discretizar su contorno.

Existen, sin embargo, limitaciones importantes que sería ingenuo ignorar y que han hecho que los modelos integrales de contorno sólo se hayan consolidado como la alternativa numérica más adecuada en algunos campos de la mecánica de los medios continuos.

Alguna de estas dificultades están relacionadas con situaciones en las que se producen comportamientos no lineales en el interior del sólido en estudio o problemas relativos a láminas delgadas de geometría alabeada. En ambas situaciones difícilmente se puede determinar el comportamiento, o incluso la propia geometría en el caso de una lámina, con sólo conocer su contorno.

Existen, sin embargo, tipos importantes de problemas en los que los modelos numéricos de contorno producen unas claras ventajas, siendo los más adecuados, si no los únicos posibles, para obtener soluciones útiles en Ingeniería.

Me referiré a dos de ellos a los que he dedicado una buena parte de mi trabajo: los problemas de interacción dinámica suelo-estructura y los de mecánica de la fractura.

Conocemos como interacción dinámica suelo-estructura a los fenómenos de interacción de fuerzas y acoplamiento entre movimiento que se producen entre suelo y estructura en grandes construcciones que, unidas al suelo, están sometidas a cargas dinámicas. El ejemplo más sencillo y el primero históricamente es el de las cimentaciones de turbinas y grandes máquinas estudiado en Alemania en los años 30. Debe garantizarse en ellas un correcto funcionamiento del equipo y pocas vibraciones en las construcciones cercanas. Posteriormente se analizaron otros problemas de gran importancia en Ingeniería como las respuestas sísmicas de puentes, presas o centrales nucleares, y más recientemente, los efectos de los trenes de alta velocidad sobre los edificios cercanos.

Todos estos problemas tienen en común que implican la propagación de ondas en el suelo y que modelos que tuvieran en cuenta únicamente la turbina, el puente, la presa, la central nuclear o la vía del tren, no representarían bien el comportamiento estructural de los mismos. Se requiere pues analizar conjuntamente el suelo y la estructura.

La modelización de un cuerpo para analizar la propagación de ondas en su interior dividiéndolo en Elementos Finitos presenta serios problemas debido a las reflexiones espurias que se producen en las uniones entre elementos. Si además el cuerpo es cuasi-infinito en comparación con la estructura como ocurre en el caso del suelo, la situación es aún peor. La discretización deberá cortarse artificialmente en algún lugar. El límite artificial del modelo produce falsas reflexiones de ondas que hacen que su comportamiento sea lejano a la realidad.

Como alternativa mas adecuada, los modelos integrales de Elementos de Contorno han permitido estudiar este tipo de problemas con notable éxito. En ellos el suelo es discretizado colocando elementos únicamente en la interfaz con la estructura y en la

superficie libre, pero no en el interior. Además, la discretización de la superficie puede interrumpirse a una distancia relativamente pequeña de la estructura sin que ello produzca alteraciones de la solución. Este hecho se debe a que tanto el problema real como la solución fundamental cumplen las condiciones de radiación de Sommerfeld y en consecuencia los valores de las integrales sobre zonas lejanas son despreciables.

El problema de la respuesta sísmica de una presa de tipo bóveda es uno de los que requiere un modelo de Elementos de Contorno mas elaborado pero para el que las soluciones de Elementos Finitos son claramente deficientes. En tales casos, el conjunto formado por la presa, el agua del embalse y el suelo que forma el vaso del mismo y sirve de base a la presa, debe ser modelado en su totalidad teniendo en cuenta la interacción suelo-presa, suelo-agua y agua-presa. Una discretización mediante Elementos de Contorno permite modelar de forma realista la propagación de ondas en el agua y en el suelo para poder así incluir adecuadamente los fenómenos de interacción. Cosas tales como la geometría del embalse o la topografía cercana a la presa, que afectan de manera significativa a su comportamiento sísmico, pueden ser fácilmente tenidas en cuenta.

El modelo integral para problemas de interacción dinámica suelo-estructura ha sido mejorado paulatinamente en los últimos quince años. Uno de los avances que implicó mayor desarrollo en la formulación fue la inclusión del efecto amortiguador de las ondas hidrodinámicas debido a los sedimentos porosos que se depositan en los fondos de los embalses debido al arrastre del agua. Para ello debió desarrollarse desde el principio la formulación integral que permite representar la propagación de ondas en medios porosos que se comportan de acuerdo con la teoría de Biot. En ellos, a diferencia de los sólidos elásticos, se producen tres tipos de ondas: dos longitudinales y una transversal.

En su estado actual, el Método de los Elementos de Contorno permite una representación precisa de los problemas de interacción dinámica suelo-estructura. Incluye grandes regiones sólidas, líquidas y porosas teniendo en cuenta la propagación de ondas en todas ellas y su mutua interacción. Es un modelo integral en el sentido matemático y también en el mas recto ya que representa todas las regiones y fenómenos que intervienen en el problema.

El segundo campo de la ciencia y la técnica al que me referiré brevemente implica un cambio de escala. Es la mecánica de la fractura. Estudia problemas relacionados con la existencia y propagación de grietas en piezas construidas con materiales diversos. En concreto me referiré a modelos de materiales elásticos y viscoelásticos, isótropos y anisótropos. El estudio mediante métodos numéricos integrales de estas piezas sujetas a cargas estáticas o dinámicas ha sido otra parte del trabajo del grupo que dirijo en la Escuela de Ingenieros de Sevilla.

Los métodos integrales de contorno resultan especialmente adecuados para el tratamiento de situaciones en las que una grieta se encuentra en el interior o arrancando desde la superficie de un sólido. La extraordinaria precisión que proporcionan ha permitido sin gran esfuerzo obtener factores claves que intervienen en la propagación.

Igualmente ventajoso resulta el hecho de que estos métodos no requieran una discretización interna del material con las dificultades que ésta conlleva en situaciones de grandes concentraciones de tensión, acompañado a veces de una geometría cambiante como ocurre en situaciones de propagación.

En los primeros modelos de elementos de contorno aún fue necesario introducir un contorno interior que dividía en dos, a través de la grieta, el sólido fisurado para poder formular numéricamente el problema. Más recientemente, a partir de los 90, se han desarrollado formulaciones hipersingulares y mixtas que permiten resolver problemas estáticos y dinámicos de mecánica de la fractura con sólo discretizar las caras de la grieta y el contorno exterior del cuerpo.

El desarrollo de estos nuevos modelos de elementos de contorno conlleva dificultades matemáticas asociadas a los núcleos hipersingulares y la evaluación de la Parte Finita de Hadamard. Han aparecido retos numéricos como los asociados a la estabilidad de las soluciones dinámicas en el dominio del tiempo, o las necesarias interpretaciones fisicomatemáticas para el desarrollo de soluciones dinámicas para materiales anisótropos.

Todo ello permite disponer en la actualidad de modelos integrales de contorno para el estudio de piezas fisuradas de materiales avanzados sometidos a cargas dinámicas. Estos modelos son claramente más robustos, precisos y manejables que los alternativos modelos de dominio.

El desarrollo y aplicación de los trabajos sobre modelos integrales me ha llevado, como a la mayor parte de los ingenieros de estructuras, a pasar mi vida profesional realizando cálculos sustentados en la Teoría de la Elasticidad. Esta rama del saber, con sus complejos y elegantes desarrollos matemáticos, es, en gran medida, una parte de las Matemáticas y un buen ejemplo de la íntima relación e intersección entre Ciencia y Técnica.

No es casualidad que haya elegido hablar de un modelo el día en que debo presentarme por primera vez ante esta Real Academia Sevillana de Ciencias, y entre los eminentes científicos que la sustentan.

Entiendo que la generación y estudio de modelos físicos y matemáticos es clave en el desarrollo científico y en el de la ingeniería moderna. Debe entenderse, sin embargo, que los modelos no son una imagen exacta de la realidad sino que singularizan para su estudio los aspectos considerados más relevantes. Se abandona lo accesorio o simplemente lo conocido para obtener una imagen más nítida de las cuestiones de interés. Un modelo es, y debe ser, irreal en el sentido más común de la palabra. Paradójicamente, si el modelo es bueno nos dará las claves para entender lo real.

El cálculo resistente de un objeto común puede ilustrar lo necesario de modelos irreales. Supongamos que se desea calcular la resistencia que deben tener las tres patas de una simple banqueta, dispuestas regularmente sobre el perímetro de un asiento circular rígido, cuando sobre la banqueta actúa una carga centrada. La solución es evidente: cada pata debe soportar un tercio de la carga. Con la intención de mejorar su resistencia, decidimos construir la banqueta con cuatro patas. El resultado paradójicamente será que disminuye la resistencia ya que cada pata debe ahora resistir la mitad

de la carga total. Una banqueta real nunca tendrá las cuatro patas iguales y el suelo nunca será del todo plano con lo cual sólo tres patas podrán apoyarse simultáneamente. De estas tres patas sólo las dos que estén diagonalmente opuestas entrarán en carga ya que el momento de la fuerza de la tercera sobre el punto medio del asiento no podría ser equilibrado y, por lo tanto, la tercera pata, aunque levemente apoyada, tampoco trabajará. Necesitamos pues un modelo tan irreal como una banqueta de dos patas para poder calcular un objeto de cuatro.

Ciencia e Ingeniería participan de la construcción de modelos para poder predecir la realidad. Mediante el modelo la realidad es transferida a un nivel teórico en el que se cumplen demostraciones y cálculos rigurosamente deductivos. Una vez analizado el modelo, las soluciones deben ser trasladadas al mundo real.

A diferencia de las cuestiones internas de la teoría que, son rigurosamente ciertas, el paso de la realidad al modelo, y de las conclusiones de éste a la propia realidad, está sujeto a unas relaciones de correspondencia que deben ser comprobadas experimentalmente y cuya validez es siempre limitada.

Hagamos un breve recorrido histórico para ilustrar la ya de por sí evidente vinculación entre Ciencia y Tecnología, partiendo de ramas tales como la Ingeniería Civil, Mecánica o Naval, que tienen su origen en prácticas artesanales que se remontan a los albores de la civilización humana.

La Ingeniería Civil (en España limitada en su nombre a los Caminos, Canales y Puertos) es generalmente aceptada como la más antigua. Hace cinco mil años que maestros egipcios dirigían grandes construcciones y extraordinarios proyectos de riego. Estos “ingenieros” eran asesores del Faraón y ocupaban un lugar relevante en la corte. Eran portadores de un conocimiento empírico acumulado durante generaciones y limitado a un contexto determinado. Sus conocimientos no eran muy diferentes de los que sobre dioses y mitos tenían en aquella sociedad los sacerdotes. Al igual que éstos, trataban sobre algo que no estaba claro para la mayoría y seguramente tampoco para ellos. Su actividad estaba totalmente alejada de la Ciencia.

En estas sociedades precientíficas, el progreso sólo podía darse por casualidad, por alguna ingeniosidad, o simplemente por prueba y error. En cualquier caso de manera extraordinariamente lenta. Esta forma de desarrollo de la ingeniería permaneció así durante miles de años hasta la aparición de la cultura helénica y la aplicación del método científico. Pronto se hizo claro que la ciencia permite moverse de manera libre y exacta dentro de la teoría para llegar a conclusiones que no pueden ser extraídas directamente de la realidad. El modelo teórico permitirá la construcción de objetos previamente inexistentes para modificar el mundo real. La ingeniería en el mundo Heleno se desarrolla en el marco de las teorías científicas y no avanza sino dentro de la estructura de la ciencia.

La ingeniería griega alcanzó, de la mano de la ciencia, desarrollos hasta entonces impensables. El tornillo y la rueda dentada fueron descubiertos por aplicación de los resultados de la geometría de Euclides. Otros desarrollos de la ingeniería mecánica fueron, los mecanismos para obtener las fases de la luna o el “dioptra” de Herón de Alejandría, precursor del actual teodolito. El faro de Alejandra tenía una altura de casi

cien metros y su luz podió verse desde decenas de kilómetros gracias a reflectores diseñados de acuerdo con los principios de la óptica. En Ingeniería Naval, los barcos de guerra contruidos por Gero II de Siracusa bajo la supervisión de Arquímedes eran quince veces mayores que los existentes hasta entonces. Algunos incluso, fueron acorazados con láminas de plomo. Hubo que esperar hasta el siglo XIX para volver a construir barcos de semejante tamaño.

El desarrollo científico-técnico fue interrumpido por la conquista romana que simbólicamente comienza con la destrucción de Siracusa y la muerte de Arquímedes en el 212 A.C. Poco después de la llegada de Cesar a Egipto ardió la gran biblioteca de Alejandría.

Los romanos estaban interesados en la organización política y militar, en el desarrollo material inmediato y, por tanto, en la aplicación de la técnica, pero no en la ciencia como sustento de ésta. Ingenieros como Vitrubio estaban fascinados con los tratados científicos griegos y en muchas ocasiones observaban con admiración sus inesperadas conclusiones, pero sin haber sido capaces de seguir sus argumentos científicos. Muestra del interés romano por la ciencia puede ser el hecho de que los "Elementos de Geometría" de Euclides, que ano son la base de la Geometría moderna, fueron traducidos por primera vez al latín en el s. XII por un inglés de Bath partiendo de un texto árabe.

Algunos avances científicos griegos fueron curiosamente "redescubiertos" en Roma. Sirvan de ejemplo algunas afirmaciones de Plinio el viejo en su "Historia Natural". En ella recoge la medida del meridiano terrestre que, con un error menor de un 1 %, había realizado el griego Eratóstenes. No obstante, Plinio explica cómo Dionisodorus bajó de su tumba hacia el centro de la tierra contando sus propios pasos para determinar así un radio de la tierra de 42.000 estadios. Plinio comenta cómo ambas medidas están bastante de acuerdo. Igualmente reinterpreta la afirmación del griego Papas que habla señalado cómo las abejas resuelven un problema de optimización de manera instintiva cuando construyen las celdas de un panal, al ser el hexágono el de mayor relación área/perímetro entre los polígonos regulares que pueden cubrir totalmente una superficie. Plinio mantiene sin embargo que las celdas son hexagonales porque las abejas tienen seis patas y construyen una pared con cada una.

El propio Vitrubio en su compendio de la tecnología de su tiempo "De Architectura" después de describir el nivel de burbuja reprocha a Arquímedes su afirmación de que la superficie del agua es esférica, con centro en el centro de la tierra. Vitrubio mantiene que un buen técnico debe saber Literatura, Historia, Filosofía, Medicina, Música, Derecho y también, por último, Geometría, Matemáticas y Astronomía. Geometría para entender la plomada y el nivel, Matemáticas para calcular el costo de los edificios y Astronomía para identificar los puntos cardinales.

Los restos de la ciencia terminaron de caer con el imperio romano en la oscuridad de la Edad Media. Unicamente los árabes salvaron algunos de los avances científicos griegos, mientras que el compendio de Vitrubio era copiado una y otra vez para su uso en las logias masónicas y las escuelas monásticas ya que, eso sí, la construcción de templos debía continuar. Las estructuras de piedra eran diseñadas con unas reglas puramente geométricas que permitían que las fuerzas se distribuyeran adecuadamente y que

las tensiones permanecieran en un orden de magnitud por debajo de las de rotura de los materiales empleados.

Es interesante observar el paralelismo entre las proporciones dadas por Vitrubio y el “Manual para la construcción de templos” que aparece en el Antiguo Testamento. En los capítulos 40, 41 y 42 del Libro de Ezequiel se definen de forma detallada las medidas y proporciones de las columnas, pórticos, muros, vestíbulos y demás elementos del gran templo. Todo ello en términos de la vara de medir que portaba un ángel que era “de 6 codos de codo y palmo”. Es decir, de 6 veces el codo largo, que tenía unos 52,5 cm, siendo pues la vara de unos tres metros. Mientras la vara aparece para medir las grandes distancias, las secciones y medidas menores son definidas en el Libro de Ezequiel en codos y palmos.

Las reglas de Vitrubio fueron recogidas y adoptadas, a veces con transformaciones, en diferentes lugares. A finales del siglo XIV se produjeron numerosos problemas en la construcción de la catedral de Milán. La Gran Medida, la vara, era entonces de 8 codos, y el codo milanés de 60 cm. Diversos problemas numéricos con la gran medida condujeron a la intervención de expertos y la detención de los trabajos en 1399.

Mignot vino de París y en su informe enumeró numerosos puntos con objeciones estructurales y geométricas basadas en las normas de su propia Loggia. Los maestros canteros italianos faltos de mejores argumentos respondieron a Mignot con la acusación: “Scientia est unum et ars est aliud” (La ciencia es única y las artes diversas). Así los maestros italianos reconocían las elaboradas reglas de Mignot pero proclamaban que en la práctica ellos, expertos canteros, sabían como construir una catedral. A todo ello respondió Mignot: “Ars sine Scientia nihil est” (nada son las artes sin la ciencia).

El trabajo de Mignot parece ser la primera aproximación racional a la Teoría de Estructuras, aún sin un entendimiento profundo de sus propias reglas.

Transcurrido más de un milenio desde el fin del Imperio Romano, el método científico fue recuperado en el s. XVII por hombres como Galileo o Newton. Inmediatamente después, la Ingeniería conoció un impresionante avance que la ha llevado hasta nuestros días.

Con frecuencia oímos o leemos en algún sitio que vivimos en un mundo cada vez más complejo que demanda una formación científica profunda. Sería, sin embargo, erróneo concluir de ello que existe actualmente una creciente formación científica del conjunto de los ciudadanos.

El diseño de un ordenador, un avión o un automóvil moderno requiere un nivel de conocimiento científico ciertamente muy superior al requerido para diseñar un aparato de radio de válvulas, un avión o un automóvil en las primeras décadas del s. XX. No obstante, los principios por los cuales funcionaba cada una de estos aparatos primitivos estaban claros no sólo para las personas que trabajaban en su proyecto sino también para los que participaban en su fabricación, los mecánicos que los reparaban y muchos de sus usuarios.

En la actualidad, por el contrario, el conocimiento necesario para proyectar un ordenador está concentrado en unos pocos lugares y ni siquiera alcanza a la gran mayoría de fabricantes de ordenadores, que son meros montadores. Algo parecido podemos

decir de los modernos mecánicos del automóvil o de las muchas fábricas que dispersas por el mundo producen aparatos de alta tecnología siguiendo las directrices emanadas de una casa matriz.

Un ordenador puede ser estudiado en tres niveles diferentes: desarrollo del hardware, programación del software y uso del software desarrollado por otros. La llamada cultura de las nuevas tecnologías consiste esencialmente en un espectacular aumento de las personas de tercer nivel: el consumidor.

La sociedad que nos rodea no requiere un número proporcionalmente significativo de científicos o ingenieros de alto nivel entre sus estudiantes. Se requiere la formación de consumidores. El consumo ya no es algo tan simple como tradicionalmente fue el comer, vestir o habitar una casa. El consumo en el mundo actual requiere una formación. La cultura dominante es la del manual de usuario.

Para convertirse en consumidores modernos los ciudadanos deben recibir en la escuela una educación física, vial; una educación cívica, administrativa, sanitaria o alimentaria, una educación informática por supuesto, pero poca educación científica. Hasta las Matemáticas que estudian nuestros hijos han pasado a llamarse en muchos casos “Matemáticas de la vida cotidiana”, por no decir “Matemáticas del consumidor”. En las escuelas de enseñanza media de Europa el método deductivo está desapareciendo, siguiendo como en tantas otras cosas la tendencia americana. En consecuencia, conocimientos muy difundidos aparecen desvinculados de las teorías que lo sustentan. Desde la perspectiva de la ingeniería, es mucho más importante que nuestros hijos estudien Física en el colegio que asignaturas de Tecnología, que por otra parte, parecen diseñadas por una multinacional del bricolage.

Es cierto que nunca antes en España o en Europa había habido un nivel y cantidad de conocimiento científico y técnico semejante al actual, pero no lo es menos que jamás tantos ciudadanos que teniendo los medios para acceder al conocimiento científico habían mostrado tan poco interés por él. La proporción de personas con inquietud por estos conocimientos, de entre quienes pueden acceder a ellos, es francamente preocupante. Esta tendencia puede ser observada incluso en la parte del mundo universitario que es oficialmente científica o técnica. No es casualidad que cada vez haya más congresos científicos o de ingeniería que se transforman en acontecimientos sociales y que promocionan fundamentalmente el turismo. El mercado de las publicaciones científicas tampoco está exento de las leyes del comercio y el consumo.

Nos encontramos sin duda en la sociedad de información y las comunicaciones. Para muchos esta sociedad donde la información fluye a gran velocidad puede ser llamada la sociedad del conocimiento. Quizás sea un nombre acertado en muchos aspectos, pero lo que no creo, es que pueda ser llamada la sociedad de la ciencia. Es muy dudoso que el método científico separado de la cultura que lo generó pueda sobrevivir mucho tiempo, y más dudoso aún es, que la Ingeniería moderna pudiera sobrevivir a un deterioro generalizado de la cultura científica. La simple idea de que el progreso continuará automáticamente se ha demostrado falsa al menos una vez en la historia, con la consecuencia de un milenio de obscuridad. No sólo es cierto que la Ingeniería necesita de la Ciencia; es el ser humano quien necesita de la Ciencia. La necesaria interacción

entre Ciencia e Ingeniería sólo será posible en un contexto en el que la Ciencia ocupe un papel relevante. Es responsabilidad de quienes hemos sido educados en la Ciencia y en la Ingeniería contribuir a la difusión de una cultura científica en todos los niveles de la sociedad a la que pertenecemos.

Este es ya el final de mi exposición. He tratado de abordar la explicación de “un modelo integral en la ingeniería de estructuras” desde distintas perspectivas: un modelo integral en el sentido matemático del término al hacerles partícipes del modelo matemático de ecuaciones integrales sobre el que ha girado la mayor parte de mi vida como investigador; un modelo integral en el sentido de la gran capacidad que este tipo de modelos tiene para representar en su totalidad sistemas resistentes complejos con regiones sólidas, fluidas o de materiales multifásicos bajo la acción de solicitaciones estáticas o dinámicas; un modelo integral en el sentido de que no es posible la Ingeniería moderna y su desarrollo sin una profunda interacción e intersección con la Ciencia.

A pesar de todas estas razones, que explican suficientemente la elección del título de esta intervención, debo confesar que cuando decidí titularla “Un modelo integral en la Ingeniería de estructuras” en lo que realmente pensaba era en el maestro Enrique Alarcón.

Nada más. Muchas Gracias.

DISCURSO PRONUNCIADO POR EL EXCMO. SR. D. JAVIER ARACIL SANTONJA

*Académico Numerario,
en contestación al leído por el
Excmo. Sr. D. JOSÉ DOMÍNGUEZ ABASCAL
en el Acto de su recepción como Académico Numerario
celebrado el día 9 de abril de 2002*

Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades que presiden este Acto,
Académicos de la Real Academia Sevillana de Ciencias,
Señoras y señores.

Es para mí un gran honor haber recibido el encargo de responder al nuevo Académico en un acto tan solemne como este, y lo cumplo con gran alegría. La presencia de miembros de la Escuela Superior de Ingenieros en la Academia es todavía muy menguada, posiblemente muy por debajo de lo que corresponde al prestigio de ese centro. Por ello, el hecho de haber sido designado por mis compañeros para recibir al primer Académico elegido por la propia Sección a la que va a pertenecer, y que además va a ser el segundo miembro de nuestra Escuela en la Corporación, es para mí una honrosa distinción que me llena de orgullo y satisfacción. Y muy en especial lo es el que la persona a la que hoy acoge la Academia sea precisamente el Ilmo. Sr. José Domínguez Abascal, al que me une una larga relación. Aún puedo traer a mi memoria el día en que, a mediados de los 70, se presentó en mi despacho un joven ilusionado, recién titulado de ingeniero, con mirada despierta, un cierto aire desgarrado, y abundantes y descuidadas barbas, muy al uso de aquellos tiempos, proclamando su vocación por la vida académica. Decía, con inconfesada resignación, que la rama de la ingeniería por la que se sentía especialmente atraído era la ingeniería mecánica, pero que habida cuenta del estado en que él la encontraba entonces en la Escuela estaba incluso dispuesto a dedicarse a la automática. No fue necesario tan descomunal sacrificio (para él, claro está, que no para la automática, que perdió una irrepetible oportunidad de sumarlo a sus activos). Felizmente se había incorporado poco antes a nuestra Escuela uno de sus más insignes e influyentes profesores, el profesor Enrique Alarcón, con el que inmediatamente le puse en contacto. Ése fue el origen de una fecunda vida académica que a partir de entonces seguí con gran complacencia, aunque desde una cierta distancia. Distancia que no ha impedido que las cosas que hacía me retumbasen periódicamente. Quizá sea por la pasión que José Domínguez pone en todo lo que hace.

Pertenece a una generación que ha tenido la inmensa fortuna de poder ver cumplida su vocación en la enseñanza superior en un medio que empezaba a adquirir prometedoras prespectivas, y alcanzar unos tintes claramente modernos, precisamente cuando él iniciaba su vida profesional. En los años 70 se producía la transición que diluía el mundo de unas arcaicas instituciones de enseñanza superior, y se empezaba a tomar conciencia de la posibilidad de que nuestros centros, como en general nuestro país, tuviesen la homologación europea que tanto se había anhelado durante los últimos siglos. José Domínguez se sumó a los que aceptaban el reto que les lanzaban los tiempos, e inició su vida de postgraduado asumiendo, con gran entrega y entusiasmo, unas incertidumbres y riesgos que, por cierto, hoy en día resulta cada vez más extraño encontrar quienes lo hagan. Comenzó de profesor Encargado de Curso en el 1975-1976. Pero el año siguiente se desplazó a la Universidad de Southampton donde inició, como Research Fellow, una fecunda actividad de investigación en mecánica de los medios continuos.

Quiso la ventura, cómo nos ha recordado el propio José Domínguez en su discurso, que allí participase en el nacimiento del método de los elementos de contorno, una variante del método de elementos finitos especialmente fértil para el análisis de estructuras. Esta feliz circunstancia iba a marcar la carrera del nuevo Académico como investigador y como ingeniero. Un año después, gracias a una beca Fullbright, ejercía como Research Associate en el Departamento de Ingeniería Civil del MIT, donde continuó con sus investigaciones sobre el método de los elementos de contorno. Precisamente en esa institución redactó una memoria que se considera como la primera aplicación de ese método a la interacción dinámica suelo-estructura. A partir de este trabajo el método se convirtió en un procedimiento ampliamente difundido y aceptado para el estudio de ese tipo de problemas. El curso siguiente, en 1978, se incorporó a la Universidad Politécnica de Madrid, para volver en 1979 a Sevilla. De aquí pasó a la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria en donde obtuvo la plaza de Profesor Agregado, especie docente hoy extinguida. Por fin, en 1982, consiguió incorporarse al que sería ya su puesto definitivo, al menos hasta la fecha, de catedrático en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Como se ve unos principios profesionales en los que se pone de manifiesto la subordinación de comodidades y seguridades a un claro designio vocacional. Una muestra de los esfuerzos sobre los que se ha construido lo más sólido de esta valiosa Escuela de Ingenieros de Sevilla y un ejemplo que no debería desdeñarse por los jóvenes aspirantes a una carrera en la enseñanza técnica superior, en los que sería deseable que estimulase el afán de emulación. Desde de 1982 las sucesivas generaciones de ingenieros mecánicos de nuestra Escuela se han beneficiado de la rica y entregada personalidad de José Domínguez Abascal.

Su producción científica ha dado lugar a múltiples publicaciones. Sus trabajos de investigación han tratado fundamentalmente de desarrollar métodos numéricos, en particular el ya mencionado método de los elementos de contorno, a la referida interacción dinámica suelo-estructura, y también a la propagación de ondas en sólidos y a los problemas estáticos y dinámicos de la fractura mecánica. Aparte de estas contribuciones, José Domínguez presentó la primera formulación de la ecuación integral de la propaga-

ción de ondas en medios poroelásticos saturados. Estos trabajos tienen especial interés en problemas relacionados con la respuesta sísmica de presas.

Artículos en revistas y comunicaciones a congresos llenan su amplio currículum. Entre las publicaciones cabe destacar dos libros. El primero, *Boundary Elements. An Introductory Course* (editado por McGraw-Hill, 1989, segunda edición en 1992, y traducido al japonés en 1993) del que también es coautor Carlos Brebbia, es ya un libro clásico sobre introducción al método de los elementos de contorno. Es un libro notable que durante años ha servido de texto en el prestigioso MIT, así como en otras muchas universidades de diferentes países. Recuerdo cuando se presentó en mi despacho José Domínguez, desbordante de felicidad, para mostrarme la curiosa traducción del libro al japonés, donde me señalaba divertido unos signos extraños que según parece correspondían a su nombre. El otro es *Boundary Elements in Dynamics* (Elsevier, 1993) del que es único autor y que resume sus aportaciones a la versión dinámica del método de los elementos de contorno. Pertenece a distintas sociedades de carácter profesional y académico. Entre estas pertenencias sobresale la de haber sido elegido Fellow de la American Society of Civil Engineers. Con estas credenciales pocas dudas podemos tener con relación al nivel científico de la obra de José Domínguez.

Pero la rica personalidad del nuevo Académico no se limita a estas contribuciones de corte científico. Su compromiso con la vida pública discurre en paralelo con la copiosa producción científica a la que acabo de aludir. José Domínguez siempre estuvo presente en cuanto problema se planteó en la Escuela, fuese éste de organización docente, de planes estudios, de proyectos estratégicos de la enseñanza, de la investigación, o de todo cuanto cubre la enrevesada vida de un centro de enseñanza técnica superior. El resultado de ello es que sucesivamente ocupó puestos de responsabilidad en la gestión de nuestra Escuela y aún de la propia Universidad de Sevilla. Todo ello culminó con el puesto de Director de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla desde mayo de 1993 hasta febrero de 1998. Recuerdo la enorme satisfacción que me produjo el saber que José Domínguez llegaba a ser Director de la Escuela. Era el primer Director que se había formado en ella. Tuve la sensación, que aún conservo, de que con ese nombramiento se cerraba un ciclo en la vida de la Escuela, que entraba así en su mayoría de edad. El periodo en el que José Domínguez fue Director es particularmente importante en la historia de la Escuela, pues en él se produjo el complejo y delicado proceso de terminar las obras de las nuevas instalaciones y de organizar el traslado a ellas desde las viejas de Reina Mercedes. Todo este proceso se llevó a cabo de forma especialmente ordenada, a pesar a su dificultad, lo que dice mucho de quien estaba al frente de esa laboriosa empresa.

Antes de ser Director de la Escuela había sido Vicerrector de la Universidad de Sevilla desde septiembre de 1990 hasta julio de 1992. Otra muestra de su compromiso con las actividades comunitarias. En la biografía del nuevo Académico no se agotan, con estas muestras, ese tipo de manifestaciones. También lo es, por recordar otra, su participación como Comisario en la compleja organización del Quinto Salón Internacional del Estudiante, Andalucía 2000. Pero no voy a cansarles con la larga lista que podríamos traer a colación. Sin embargo, sí quiero manifestar mi convencimiento de

que en el futuro lo veremos de nuevo al frente de otras empresas incluso de mayor ambición que las que acabó de recordar.

Para completar el retrato, además de los trazos que ponen de manifiesto la capacidad investigadora, por una parte, y la de gestión de la enseñanza superior y de la investigación técnica, por otra, creo que hay que detenerse, siquiera un poco, en la labor de José Domínguez como ingeniero. Como es natural esta es una faceta especialmente importante del nuevo Académico. Al fin y al cabo, un ingeniero tiene que ser ante todo ingeniero. Entre sus trabajos en este orden de cosas destaca el proyecto y cálculo de la cubierta textil del Palenque de la EXPO'92, en colaboración con el arquitecto José Manuel de Prada Poole. También el software para el cálculo dinámico/sísmico de cimentaciones de edificios de centrales nucleares y de otras centrales de producción de energía eléctrica. Y por último, por citar algo más, el cálculo y diseño de la estructura portante y bancada para generadores eólicos de 300Kw. Asimismo se podría hacer referencia a algunas expresiones simplificadas para el cálculo dinámico de cimentaciones superficiales y enterradas, que se recogen en manuales de diseño publicados en Francia y EEUU.

José Domínguez ha afirmado, todos lo hemos oído, que se considera un científico. Esta afirmación, que es natural oírse a alguien que está ingresando en una Academia de Ciencias, requiere ciertas matizaciones en boca de un ingeniero. En ella hay que entenderla con un significado análogo al que tendría, por ejemplo, en la de un médico. Es decir, de un profesional que utiliza la conjunción de razón y experiencia que caracteriza al método científico, y que además se beneficia de los logros de la ciencia, en el sentido convencional de ese término, pero cuyo papel social no es fundamentalmente el acrecentar el conocimiento que se tiene con respecto a las cosas, sino el resolver problemas prácticos en ámbitos concretos.

Un científico se ocupa de estudiar los fenómenos naturales aplicándoles los elaborados y rigurosos procedimientos que constituyen el patrimonio del método científico. Con el concurso de estos métodos, y con su estricta y sistemática aplicación, los científicos han llegado a construir uno de los mayores y más sólidos edificios intelectuales de los que podemos sentirnos legítimamente orgullosos los humanos: el conocimiento científico del mundo. Y ello hasta el extremo de que hemos llegado a identificar ese conocimiento con lo que se esconde tras ese término tan escurridizo filosóficamente como es el de realidad. Un ingeniero, sin embargo, no se ocupa de las cosas como son, como se encuentran en la naturaleza, como nos han sido dadas, sino que su cometido es radicalmente distinto. Es concebir otras de las que la naturaleza no nos ha provisto y de conseguir hacerlas realidad, no sólo, claro está, como prototipos, más o menos ingeniosos, sino como productos robustos que consigan una amplia aceptación social. Piénsese que no sólo estamos hablando de concepción, sino de construcción de acuerdo a determinadas normas que garanticen su robustez y seguridad, de producción con unos costes que permitan su comercialización y su implantación en el cuerpo social, y de tantos otros aspectos de la polifacética actividad del ingeniero. El mundo artificial no está hecho sólo de ideas brillantes, sino de realizaciones que funcionan.

El proyecto de un nuevo objeto técnico o artefacto implica una mezcla ponderada de imaginación, por una parte, y de síntesis de experiencia y conocimiento, por otra. Los ingenieros hacemos conjeturas acerca de cómo ensamblar los componentes que integrarán lo que proyectamos. El ingeniero mide, calcula y realiza inferencias lógicas relativas a aquello que está concibiendo y que está tratando de que adquiera una realidad tangible. Cuando esto último se ha conseguido, tiene además que conseguir una explotación de ese producto, para lo que también seguirá aplicando esas mismas pautas de racionalidad y de empirismo que tanto le acercan al científico. En efecto, ambos emplean métodos cuantitativos y razonan de forma completamente similar. Los conceptos que utilizan son los mismos, hablen de una masa o de la intensidad de una corriente eléctrica. Los dos se someten al tribunal de la experiencia y al imperio de la razón. Pero repárese en que la aplicación de los métodos científicos la hace el ingeniero a sus construcciones intelectuales después de haberlas concebido, a los productos de ese acto creativo que es el proyecto o concepción de algo con lo que se alivia una carencia.

Así pues, una vez el proyecto está articulado debemos analizarlo de la misma forma que lo hace un científico con los hechos o cosas de la naturaleza. Y es precisamente en este punto en el que emerge la componente científica de los ingenieros; es donde ciencia e ingeniería se solapan. Pero sin olvidar que aunque científicos e ingenieros empleamos las mismas herramientas conceptuales, los distintos objetivos que perseguimos determinan el radicalmente diferente uso que hacemos de ellas. Esto que se pone especialmente de manifiesto, entre otras muchas cosas, en lo tan marcadamente diferenciados que son los procesos de formación de científicos y de ingenieros.

Lo característico del método del ingeniero es creación sometida a las inevitables restricciones que imponen las leyes de la naturaleza. La ingeniería consiste en un largo proceso de revisiones entre dos extremos: el estadio creativo en el que se conciben nuevas ideas; y el analítico en el que estas ideas se someten al implacable rigor de la racionalidad. La grandeza y la peculiaridad de nuestra profesión gira en torno a esa doble polaridad: desbordamiento creativo en la concepción, y análisis de la viabilidad de esas concepciones en consistencia con lo que sabemos de las leyes de la naturaleza. Esta consistencia no es un lujo intelectual. Nos hace patentes los ineludibles límites entre los que puede discurrir nuestra capacidad creativa. Al fin y al cabo los objetos artificiales obedecen las mismas leyes que aquéllos de los que nos ha dotado la naturaleza. Además, estos objetos se acaban incorporando al mundo real, invadiendo con indudable éxito el medio complejo y profundamente elaborado en el que nos movemos, y en el que se hace cada vez más imprecisa la barrera entre lo natural y lo artificial.

El conocimiento de los ingenieros, nuestra ciencia, es sobre cómo hacer determinadas cosas artificiales. El ingeniero es, si se quiere, un científico de lo artificial, adoptando la conocida propuesta de Herbert Simon. En esta caracterización de científico es en la que ingenieros investigadores como José Domínguez encuentran su perfecto encuadre. Y es en ese sentido, no me cabe duda, en el que él se proclama un científico y, claro está, yo estoy completamente de acuerdo con él.

Es un hecho que desde siempre los ingenieros hemos estado presentes en primera fila en la promoción y ejecución de la ciencia en España. No olvidemos que las Es-

cuelas de Ingenieros se crean en nuestro país antes que las Facultades de Ciencias, que aparecen como una especialización de las de Filosofía, y cuyos orígenes, además, no son ajenos a las necesidades de formación básica de los propios ingenieros. Si se consulta la composición de la Academia de Ciencias de España, en el siglo XIX, se comprobará hasta qué extremo la presencia de ingenieros era mayoritaria en ella. Para los ingenieros ha sido siempre un motivo de orgullo esta relación con la ciencia y es normal que un ingeniero acepte con halago la consideración de científico y que aspire a llevar con orgullo ese calificativo.

Estoy convencido de que el nuevo Académico, lo mismo que ha tenido una decisiva influencia en la formación del medio material en el que se están forjando los futuros ingenieros sevillanos, también lo tendrá en la construcción de un marco conceptual que nos ayude a entender y clarificar esa creativa, imaginativa, polifacética, rica, variada, rigurosa, científica forma de actividad que llamamos ingeniería. Con ese convencimiento, y con el de que la Real Academia Sevillana de Ciencias puede ser un marco en el que tanto por cooperación, como por contraste, se clarifique esa identidad, me atrevo a pensar que la incorporación de José Domínguez a la Academia es un motivo por el que todos debemos congratularnos. La Academia porque se incorpora a ella un valioso representante de ese modo de actividad que tan estrechas relaciones guarda con las ciencias convencionales, en estos momentos las más sólidamente establecidas en la Academia. La ingeniería porque uno de sus hombres pasa a enriquecerse con su participación regular en un foro multidisciplinar y enriquecedor, en el que va a tener sobradas ocasiones de ampliar su visión del complejo y fascinante mundo de la ciencia.

Me corresponde el privilegio de darle la bienvenida en nombre de la Academia. Cumpro con gran satisfacción esta honrosa misión y le deseo que, entre nosotros, su mundo científico se vea enriquecido y ampliado como, sin duda, lo será el nuestro con su presencia en ella.

Muchas gracias.