

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

LOS PROGRESOS DE LA CONSTRUCCIÓN
Y DE LA MECÁNICA APLICADA

DISCURSO

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN

POR EL EXCMO. SEÑOR

D. JUAN MANUEL DE ZAFRA Y ESTEVAN

Y

CONTESTACIÓN

DEL EXCMO. SEÑOR

D. AMÓS SALVADOR

PRESIDENTE

EL DÍA 30 DE NOVIEMBRE DE 1919



MADRID

IMPRESA CLÁSICA ESPAÑOLA

Glorieta de Chamberí.—Teléfono J.-430.

1919

DISCURSO

DEL EXCMO SEÑOR

D. JUAN MANUEL DE ZAFRA Y ESTEVAN

SEÑORES ACADÉMICOS:

Vuestra benevolencia ha querido otorgar a mi trabajo altísimo premio, que jamás soñé. No intento alardear de modestia; me habéis juzgado digno de contarme entre vosotros y aquí me tenéis, enorgullecido por tal honor. Mi agradecimiento no con palabras, con obras he de probároslo.

Por desgracia, he llegado a este sitio a costa de perder la Academia uno de sus más insignes miembros, don Vicente de Garcini, y yo, al un tiempo maestro, después compañero, por último jefe en la Escuela de Caminos y siempre amigo queridísimo, al que profesaba entrañable afecto. Igual me lo dispensaba él; poco antes de su muerte quiso jubilarse, tan sólo para hacer así posible mi entrada en esta Academia.

Todos tenéis bien presente al hombre sencillo, cortés, afable, bueno en toda la extensión de la palabra; todos recordáis su vasta inteligencia, su gran cultura, su agudo ingenio. Pero no puedo menos de reseñaros, siquiera sea a grandes rasgos, su vida de incesante y fecundo trabajo.

Casi niño y ya de salud muy escaso, empezó su áspera lucha: actuario en una Compañía de seguros, se preparó para ingresar en la Escuela de Caminos, y ganó al mismo tiempo reñida oposición para entrar en el Observatorio Astronómico.

Terminó brillantemente, sin abandonar su plaza de actuario, la carrera de Ingeniero de Caminos, con el número uno de una lucida promoción. Sin puesto, por entonces, en el Cuerpo, se dedicó a la enseñanza privada, entrando pocos años después en el profesorado de la Escuela de Caminos. Allí, en el curso de 1890-91, tuve la honra de ser su discípulo en la clase de Máquinas. Desde el primer día su clara inteligencia y su dominio de la materia le dieron grandísimo prestigio, al mismo tiempo que su natural llano y afable le conquistó el cariño de todos sus alumnos. Por desgracia, no pudo terminar aquel curso: una grave enfermedad puso en peligro su vida. De 1897 a 1909 volvió a ser Profesor, y desde 1913 hasta 1915, Director de la Escuela.

Al crearse la Comisaría de Seguros fué llamado para organizarla el señor Garcini: sus especiales conocimientos en la Ciencia actuarial, de los que dió tan lucida muestra en su notable discurso de entrada en esta Academia, hacían de él la persona más capacitada para planear y reglamentar tan importante organismo. Su gestión fué allí como lo había sido en cuantos cargos desempeñó: activa, inteligente y fructuosa en extremo.

Para alabar como se debe a mi querido maestro, no encuentro nada mejor que repetir algo de lo que nuestro insigne compañero el señor Torres Quevedo dijo al contestarle en el acto de su recepción como Académico. «Poco o nada queda de las explicaciones del señor Garcini durante su largo profesorado, salvo las *Lecciones del Curso de Máquinas*; pero este libro basta para darnos muestra de su valer como expositor y como maestro, y merece lugar distinguido entre los de los más eminentes autores que han tratado el mismo asunto. La teoría de los pares y cadenas cinemáticos,

» inspirada quizá en Reuleaux, pero desarrollada con completa originalidad, en forma clara y concisa, perfectamente adecuada a las necesidades de la Escuela, pudiera servir de base para un estudio sistemático y completo de los mecanismos. » De sentir es que el señor Garcini no le haya desarrollado, y más sensible aún, que no se hayan recogido las lecciones que sobre diferentes asignaturas ha explicado en sus veintiséis años de profesorado. »

El recuerdo del señor Garcini, Profesor eminente, Ingeniero meritísimo, perdurará en la Escuela y en el Cuerpo de Caminos, como perdurará seguramente entre vosotros.

* * *

Cumplido el deber, para mí doblemente obligatorio, de rendir cariñoso tributo a mi ilustre antecesor e inolvidable maestro, tengo que hablaros de algo que merezca vuestra atención. Del vastísimo campo de las Ciencias exactas, físicas y naturales, he de elegir algún tema que, no digo domine— no encontraría ninguno—, que esté al alcance de mis fuerzas, que me sea familiar.

Huérfano de Ingeniero, soñé desde muy niño ser Ingeniero también, llegar a construir muchas obras, muy grandes, muy atrevidas... No creo que nadie haya estudiado su carrera con más ilusión que yo la mía. La Mecánica racional, y más todavía la Mecánica aplicada a las construcciones y a las máquinas, fueron mis favoritas entre las Ciencias, al mismo tiempo que Puentes y Puertos entre las asignaturas de Ingeniería.

En el puerto de Sevilla, donde estuve diez y seis años, desde que salí de la Escuela hasta que a ella volví de Profe-

sor, encontré ancho campo donde desarrollar mi afición a los problemas de Construcción y de Mecánica; allí empecé a estudiar teórica y prácticamente, a costa, en un principio, de trabajo, sinsabores y zozobras sin cuento, lo que más tarde me proporcionó honra y provecho y vino a polarizarme, por decirlo así, en mi carrera: el hormigón armado.

Este maravilloso material constructivo, legado por el precedente siglo en forma tosca y rutinaria, me sedujo desde el primer momento. Vi en él reunidas mis aficiones favoritas, la Mecánica y la Construcción, que estrechamente ligadas habían de producir fecundísima cosecha de obras grandes, nuevas, atrevidas... Me lancé a construir y, aunque tímidas y modestísimas mis primeras obras, me enseñaron desde luego la apremiante necesidad de huír de la rutina que entonces imperaba, de tratar aquellos problemas de un modo más ingenieril, más científico; de estudiar mucha más Mecánica, en resumen.

Puedo decir, y perdonadme que lo diga con orgullo, que fuí casi por completo autodidacto; me repugnó pagar tributo moral ni material a los seudo-inventores que pretendían monopolizar el hormigón armado. No con ilusiones de inventor, sino por puro afán de huír de la rutina, traté siempre de buscar las formas, cantidades y distribución de materiales que cada problema por su índole mecánica requiriera. Y me encontré así cada vez más necesitado, más enamorado de la Mecánica. El proceso se repitió muchas veces; cada obra a que me lanzaba, más atrevida que las anteriores, demasiado atrevidas algunas, porque las circunstancias y mi pasión por esos problemas me hicieron ser audaz, me enseñaba algo nuevo y me enseñaba que debía estudiar muchísimo más.

Esto que en modesta escala me ha ocurrido, sucedió y si-

que sucediendo en la Ingeniería en general: el progreso de la Construcción exige cada día más imperiosamente el progreso de la Mecánica aplicada. Y aquí tenéis el tema que, a grandes rasgos y refiriéndome especialmente al hormigón armado me propongo desarrollar.

*
**

Durante muchos siglos sólo se utilizaron para la construcción los materiales pétreos. Los primeros monumentos, de carácter conmemorativo o religioso, concebidos bajo la idea dominante de alcanzar una duración ilimitada, fueron conjuntos de enormes piedras, sin más enlace que el de su peso; al principio, sin labra alguna (monumentos megalíticos, obras ciclópeas); después, tosca, esmerada y hasta prodigiosamente labradas (pirámides y templos egipcios).

Los pueblos faltos de piedras naturales crearon las artificiales, adobes y ladrillos, muy grandes al principio y sentados a hueso; después, más pequeños y trabados con betunes y morteros.

Apareció la bóveda, forma por excelencia para resistir a la compresión, y se empezó más tarde a usar el mortero para enlazar las piedras. El tamaño de éstas fué aminorando hasta nacer el hormigón, obra del pueblo romano y reflejo de su carácter utilitario. Merced al hormigón, se construyeron rápida y económicamente enormes masas, revestidas de piedra para obtener la belleza y durabilidad deseadas. Generaciones posteriores utilizaron como canteras esos monumentos que, perdida su hermosa envolvente, pudieron subsistir gracias a ser de hormigón.

Las obras de piedra prosiguieron su perfeccionamiento

hasta llegar al más alto grado en manos de los constructores medioevales. Pero las formas alcanzaron tanta esbeltez y atrevimiento, que resultó insuficiente la trabazón debida al mortero. Nació entonces la idea de asociar a la piedra, que resiste bien a la compresión, otro material que contrarrestara las tensiones, y se emplearon, primero, llaves formadas por huesos, después, grapas, y, por fin, tirantes metálicos.

Poco antes que los ferrocarriles se empezaron a usar los materiales metálicos, y reapareció la idea de su asociación con los pétreos. Pero en lugar de ser el hierro oscuro auxiliar anegado en la masa de fábrica, como lo había sido siglos atrás la paja amasada con la arcilla, tomó el metal un papel preponderante, naciendo así el puente colgado, recíproco de la bóveda y forma por excelencia del material resistente a la tracción.

Los dos materiales se complementaron, pero sin realizar una asociación perfecta; se yuxtapusieron sin compenetrarse, se dividieron el trabajo sin ayudarse mutuamente.

Desde la aparición de los ferrocarriles se afirmó cada vez más el carácter esencialmente utilitario de la mayoría de las construcciones. El empleo de materiales metálicos hizo nacer nuevas formas: tras el arco, imitación de la bóveda, y tras el puente colgado, caído en descrédito por errores de la época, vinieron las vigas tubulares, los arcos atirantados, las celosías articuladas y rígidas, los puentes grúas, hasta alcanzar vanos de 518 metros en el del Fórth, y últimamente de 548 en el de Québec. Poco antes de terminarse aquél resurgió vigorosamente el puente colgado, alcanzando 486 metros de luz en el de Brooklyn, y parece casi seguro que se llegará al colosal vano de cerca de 900 en el del Hudson.

La gran resistencia específica del metal sólo puede ser

utilizada hasta lo último cuando trabaja por tracción; en el caso inverso no basta la sección estricta, es preciso que la acompañe un cierto momento de inercia, y para obtenerlo, aun distribuída en formas huecas y rígidas, esa sección no alcanza y es menester aumentarla. Y de no atender a esto sobreviene el pandeo, la causa de la catástrofe del puente de Québec.

La fábrica, inepta para trabajar por tracción, resiste a un tiempo pandeo y compresión sólo con tener ésta en cuenta, gracias a su mediana resistencia específica.

El perfeccionamiento de los aglomerantes y la carestía de la mano de obra restringen cada vez más el empleo de las piedras labradas, para sustituirlas, en lo que no ha de tener carácter monumental, por elementos más pequeños, que dan fábricas de ejecución más rápida y económica. La que en más alto grado presenta esas condiciones, el hormigón, se desarrolla prodigiosamente; sobre todo en el pueblo más positivista, el yanqui.

En la fábrica, como en el metal, la forma más económica es la relativa al mínimo de dimensiones elementales: barras de poca sección y gran longitud, en uno; pequeñas piedras, todas aglomeradas formando grandes masas, en la otra. El material por excelencia en nuestra época, esencialmente utilitaria, no puede ser ninguno de aquéllos, ni separados ni yuxtapuestos; es el conjunto, la combinación íntima, la compenetración mutua de los dos, para que cada uno supla las deficiencias del otro, para sumar sus buenas cualidades y restar sus defectos. Los dos grandes principios de la asociación y de la división del trabajo se realizan en el hormigón armado, híbrido de dos elementos antitéticos a más no poder y que, sin embargo, se funden admirablemente en uno, obede-

ciendo a la ley del contraste, a esa misma ley que tantas veces fuerza a la mujer hermosa a gustar del hombre feo, a la débil, del atlético...

*
* *

¿Qué ha sido la Mecánica de las construcciones durante los millares de años requeridos por esa evolución que tan escuetamente os acabo de reseñar? Hace tres siglos aun no había nacido; durante dos de éstos sus pasos fueron vacilantes, muy lento su desarrollo, y hasta hace unos cien años no empezó a constituir un verdadero cuerpo de doctrina.

Y, sin embargo, ¡cuántas portentosas obras ejecutaron todas esas generaciones ignorantes de nuestra Mecánica! Desconociéndola, puede afirmarse que la presentían. Entre las aplastantes masas de los monumentos egipcios y los encajes de piedra de las catedrales góticas media un abismo. De la pesada hiperestabilidad de los primeros, la experiencia y el instinto fueron paso a paso llevando al constructor a la atrevidísima esbeltez de las últimas. Pero ¡cuántas infructuosas tentativas, cuántos desengaños, cuántos derrumbamientos fueron necesarios para adquirir esa experiencia, para desarrollar ese instinto!

El sentimiento artístico, la belleza de la forma fueron el objetivo del constructor, y no la reducción de dimensiones por economizar materiales. Fijados empírica o intuitivamente los espesores, la construcción misma sirvió de guía para reforzar aquéllos, para modificar la estructura con la adición de elementos que le dieran la estabilidad visiblemente comprometida, o a veces perdida por completo. Apenas terminada, se derrumbó gran parte de la cúpula de Santa Sofía, de Constantinopla; análogas catástrofes ocurrieron en muchas catedra-

les, entre las nuestras en la de Sevilla. Y sin llegar a tal extremo, las más de las grandes obras requirieron o consolidaciones o reformas numerosas e importantes.

A fuerza de errar se fué aprendiendo; se llegó a saber una Mecánica instintiva, inconsciente, pudiera decirse, que subsiste aun hoy día entre muchos constructores que, ayunos de conocimientos científicos, solucionan bien problemas nada fáciles. Los carpinteros de ribera, por ejemplo, dejan admirado a quien les ve trazar intrincadas figuras, con las que determinan forma y dimensiones de una embarcación, intersecciones de superficies de complicadas formas, y tantos otros difíciles problemas que requieren bastantes conocimientos de Mecánica y de Estereotomía, y que ellos resuelven por sencillas reglas transmitidas de unos a otros por aprendizaje.

Hay que confesar que esa misma Mecánica intuitiva es aun hoy día la que suple las imperfecciones, el atraso de la científica. El Ingeniero constructor más concienzudo jamás puede, por mucho que apure el estudio, llegar a la determinación rigurosa de todos los elementos de una obra: muchos de ellos a veces, algunos siempre, tienen que ser fijados por comparación con otros análogos o parecidos y ya sancionados por la práctica, o simplemente a sentimiento, sin que el cálculo pueda prestar la menor ayuda. Nos encontramos más adelantados que nuestros predecesores, pero nos falta, relativamente a las necesidades de nuestra época, más, quizá, que a ellos en la suya. El utilitarismo, carácter fundamental de las obras de Ingeniería, les impone la condición de limitarlo todo a lo *necesario y suficiente*, supremo ideal hacia el que nos hemos aproximado bastante en poco tiempo, pero del que nos separa aún largo camino.

El utilitarismo ha sido el gran impulsor de la Mecánica de

las construcciones. El desarrollo de los ferrocarriles llevó consigo el empleo en creciente escala de los materiales metálicos, hasta entonces apenas usados, y que exigieron desde luego la mayor limitación posible de las cantidades y la ideación de nuevas formas constructivas.

La Mecánica *interna*, por decirlo así, corresponde al primer objetivo, al de conocer en todos y cada uno de los puntos de cualquier elemento constructivo las cargas moleculares que soporta el material, para proporcionar a ellas la cantidad y distribución de éste. No es sino la teoría de la elasticidad llevada a la práctica, y, por desgracia, pese a las poderosas inteligencias que a ella se han aplicado, se encuentra todavía muy por bajo de lo que debiera. En lo más esencial para su utilización práctica muy poco se ha progresado.

La Mecánica *externa*, en cambio, el cálculo de estructuras, cuyo objeto es el estudio de las combinaciones de elementos constructivos para determinar las acciones que los solicitan y las formas de agrupación más favorables, se ha desarrollado notablemente, aunque tampoco alcanza el grado de perfección que deseamos. A su progreso ha contribuído poderosamente desde principios de este siglo el hormigón armado, con su enorme difusión, con su vastísima escala de aplicaciones.

* * *

La idea de asociar dos materiales, resistentes uno a compresión, otro a tracción, es antiquísima: el tapial no difiere genéricamente del hormigón armado. Hace años se ha propuesto substituir la arcilla por hormigón y la paja por trozos de alambre, con el fin de alcanzar en cualquier punto de la masa y en cualquier dirección resistencia a las tensiones que

puedan desarrollarse. No sé que se haya llevado a la práctica, ni creo que esa idea pueda conducir a nada provechoso.

En las primeras patentes relativas al hormigón armado, y que remontan a 1867, se refleja la intención de poner armaduras, si no distribuídas en toda la masa, poco menos; aunque aparecen ya como barras en corto número, su situación, forma y direcciones revelan completa ignorancia de dónde son eficaces y dónde no. Son, poco más o menos, lo mismo ya hecho desde muchos años antes: telas metálicas anegadas en yeso o en mortero.

Abarcaron esas patentes la aplicación de esa idea, que no era nueva, a la fabricación de un sin fin de objetos: macetones, depósitos, tubos, puentes, cubiertas... ¡hasta féretros! Empezaron a realizarse con fruto algunas de esas aplicaciones, y surgió una competencia industrial que pronto llegó a ser formidable. Todos se proclamaban inventores de nuevos *sistemas*, variantes todos, algunos racionales, infantiles o disparatados los más, de la única idea fundamental, la de poner armadura dónde y en la cantidad que el hormigón la necesita. Las patentes se modificaron, pero más que de invención fueron de curso, para poder cada uno, por variar la posición de unos alambres, o por añadir otros, titularse inventor de un *sistema* y entrar en liza, espigar en el campo. Tal tuve que hacer yo mismo, amenazado por aquellos explotadores, de los que uno, modestamente, se apellidaba verdadero y único inventor del verdadero hormigón armado, pese a lo cual sus patentes fueron declaradas nulas por los Tribunales de su país. Yo, que no pretendí inventar nada, no me volví a acordar de las mías, armas defensivas ya innecesarias, y proseguí estudiando y tratando de mejorar mi práctica y mi teoría.

Esa misma intención animaba ya a otros muchos. En Ale-

mania fué donde primero, bastantes años antes, se empezó a estudiar con método y rigor, experimental y teóricamente, el nuevo material. Ese estudio no se ha interrumpido desde entonces, y a él han contribuido en gran escala importantes Empresas constructoras. Más tarde, investigadores de otros varios países emprendieron y continuaron fructuosamente la misma tarea. Vinieron después las Comisiones oficiales para reglamentar el empleo del hormigón armado, y estatuyeron las normas hoy vigentes, ampliadas y corregidas al cabo de algunos años las de Suiza y Alemania. En estos países no han cesado esas Comisiones, sino que prosiguen tenazmente sus estudios, como también algunas de las Universidades norteamericanas.

Resumiré brevemente lo más fundamental de lo que hasta el día se sabe. El hormigón armado es heterogéneo, como lo son genéricamente todos los materiales que manejamos. La diferencia es cuestión de escala. Examinado al microscopio, el más fino acero aparece constituido por una suma de elementos, poliédricos unos, fibrosos otros, íntimamente aglomerados por otros más finos; es decir, por los mismos tres órdenes de los que, en tamaño mucho mayor, pero genéricamente iguales, integran el hormigón armado.

Este material es imperfectamente elástico, y también lo son todos *en su estado inicial*. La diferencia de escala en la finura de composición se traduce en otra análoga en el paso de la elasticidad inicial, imperfecta, a la final, perfecta. Se cree que los metales ferrosos, el acero, son desde un principio obedientes a la ley de Hooke, a la exacta proporcionalidad entre la causa y el efecto, la carga y la deformación, dentro del límite que se llama de elasticidad perfecta. Visto el fenómeno, por decirlo así, al microscopio, no hay tal: es

idéntico, salvo la escala, al que el hormigón armado ofrece.

Sometido un trozo de este material a una carga, su deformación alcanza un cierto valor, dependiente de la intensidad de aquélla y del tiempo durante el cual actúa. Suprimida la carga, no desaparece toda la deformación: queda un residuo, *plástico*, por contraposición al resto que se ha anulado, *elástico*. Una nueva aplicación de la misma carga, seguida por otra supresión, produce análogos efectos: se alcanza una deformación total, menor que la anterior; subsiste un nuevo residuo plástico, menor también que su homólogo y que representa una parte alícuota de la deformación total más pequeña que en el primer caso. La reiteración del proceso, limitada siempre la carga al máximo valor dado en el primer período, conduce rápidamente a una *extinción total del residuo plástico*; es decir, a un régimen final de *elasticidad perfecta*, de deformaciones *totalmente elásticas*, exactamente proporcionales a las cargas, siempre que éstas no superen a la ya repetidas veces sufrida. El coeficiente de elasticidad va disminuyendo al mismo tiempo, cada vez más lentamente, hasta quedar con un valor fijo y constante.

Si se repite el proceso con cargas superiores a las ya sufridas, se llega nuevamente, por análoga gradación, a otro régimen final de elasticidad perfecta, caracterizado por otro coeficiente más pequeño aún. Y así sucesivamente, mientras dichas cargas no alcanzan un cierto valor límite.

Este fenómeno es simplemente la manifestación de leyes universales en la naturaleza: el cambio progresivo de estructura para conservar la existencia, por adaptación a las condiciones del medio ambiente.

Huelga casi decir que esas deformaciones residuarias permanentes, que nacen durante el período de adaptación, son

de un orden tan pequeño, que las más de las veces no llegan a ser apreciadas por los aparatos de medida cuando se aplican a obras enteras: sólo con los medios de alta precisión empleados en los laboratorios se consigue siempre valorarlas. Proverbial es la pequeñísima deformabilidad de las obras de hormigón armado, y ésa se refiere al total de las deformaciones, no a la parte alícuota, siempre muy reducida respecto a éste.

¿Qué pasa con el acero? Exactamente lo mismo, salvo la escala, pequeñísima si se trata de una pieza sola, mucho más perceptible si de una obra. La desventaja para el hormigón armado de lo basto y grosero de su estructura, comparado con lo fino y microscópico de la del acero, se compensa merced a la heterogeneidad que en la obra metálica introducen las juntas, cuya transcendencia es de orden más elevado que la heterogeneidad elemental de la obra de hormigón armado, monolítica. El proceso de adaptación, prácticamente insensible en la pieza metálica suelta, no lo es en la obra entera. Es más: la causa de ello, las juntas, puede muy bien con el tiempo y con la reiteración de cargas no mantener el régimen final permanente, sino provocar, por el aflojamiento progresivo, el paso a otros regímenes de menor elasticidad del conjunto.

Aparte de ese peligro, llegamos con los dos materiales a un mismo estado final. Una obra de hormigón armado, lo mismo que una metálica, nunca es en un principio, pero siempre *llega a ser* elástica de un modo perfecto y permanente y a cumplir con exactitud la ley de Hooke.

El hormigón armado puede y debe ser tratado lo mismo que el acero, como un cuerpo perfectamente elástico. El punto delicado es la fijación de su coeficiente de elasticidad. En-

seña la teoría que un cuerpo, de elasticidad variable de un punto a otro, es mecánicamente idéntico, sufre en cada punto las mismas cargas y deformaciones que otro cuerpo *virtual*, homogéneo, cuya sección sea la suma de productos de cada sección elemental por la relación de su propio coeficiente de elasticidad a uno arbitrario, el menor de todos, por ejemplo, y cuyo momento de inercia esté análogamente definido. Las cargas deducidas para el sólido virtual, multiplicadas por dicha relación de coeficientes de elasticidad, son las cargas homólogas en el sólido real.

El teorema es exactamente aplicable al caso del hormigón armado, sin más restricción que la coincidencia de un plano principal de la armadura con otro plano principal del hormigón, aisladamente considerados.

El coeficiente de elasticidad de la armadura es conocido y prácticamente constante. El del hormigón, ya dentro del régimen definitivo, también, pero con una particularidad: tiene un valor prácticamente constante respecto a cargas de compresión y un valor distinto para las de tensión, y en cuanto éstas se acercan a la de rotura el coeficiente decrece con suma rapidez y puede ser considerado como nulo.

La aplicación del teorema del sólido virtual homogéneo equivalente al real heterogéneo sería absurda si no enseñara la experimentación, *suprema lex* del Ingeniero, que prescindiendo en absoluto de hacer entrar en la evaluación de secciones y momentos de inercia todos los elementos de hormigón que han de estar estirados, hay un cierto valor de la relación de coeficientes de elasticidad, constante y determinado, que conduce a un acuerdo casi perfecto entre las cargas calculadas y las medidas en cualquier punto del sólido real. Y con la ventaja, que compensa la no perfección del acuerdo,

de que la discrepancia es siempre en sentido desfavorable, en el de exagerar las cargas calculadas y, por tanto, aumentar implícitamente la seguridad.

En multitud de casos es *a priori* desconocida la parte de cada sección que ha de sufrir tensiones. El cálculo de toda construcción hiperestática, como la mayoría de las de hormigón armado, requiere precisamente la fijación previa de las secciones y momentos de inercia. Los resultados experimentales demuestran que se obtiene una primera aproximación en aquel cálculo computando secciones y momentos de inercia como si el hormigón, sin armadura alguna, fuera isótropo. Con los resultados de esa primera aproximación pueden ser evaluados nuevamente secciones y momentos de inercia del hormigón comprimido y de las armaduras, y repetir el cálculo con aproximación más satisfactoria.

El Ingeniero necesita constantemente recurrir a la experimentación para contrastar, no la teoría que, dentro de las bases sentadas es indiscutible, sino las condiciones y límites de aplicabilidad, los fenómenos y circunstancias que aquélla es inhábil para tener en cuenta. Entre los cuerpos ideales que maneja la teoría de la elasticidad y los que maneja el Ingeniero, cuerpos reales con peculiaridades y anomalías imposibles de tener en cuenta en el cálculo, hay un lazo común y al mismo tiempo un abismo, y éste sólo puede ser salvado mediante la observación de la realidad.

Teoría y práctica son igualmente necesarias, las dos aunadas: aquélla, para investigar y para analizar los resultados de ésta, para sobre lo conocido poderse aventurar poco a poco en lo desconocido; la segunda, para sancionar, completar y perfeccionar a la primera. El hombre de acción que se limita a reproducir lo ya conocido, puede contentarse con la sim-

ple práctica, con la rutina; el hombre de acción y de progreso, tal debe siempre ser el Ingeniero, no debe contentarse con lo ya alcanzado, sino aspirar a mejorarlo, poco o mucho, siempre algo, a sumar su trabajo con el de sus predecesores. Necesita ir siempre con la práctica y con la teoría, sin exclusivismo por una ni por otra, sino con la vista en las dos a un tiempo, como el barco que gracias a un buen balizamiento luminoso sigue con absoluta seguridad una derrota que jamás ha navegado, sin más que mantenerse siempre entre la luz de estribor y la de babor.

* *
* *

El mutuo apoyo que práctica y teoría se prestan, la emulación con que una de ellas adelanta basándose en la otra, para luego servirle a su vez de sostén y estímulo para nuevos progresos, se han hecho más patentes que nunca en lo que va de siglo. Hasta el principio de éste duró el período, que se puede llamar intuitivo, del hormigón armado. La práctica llevaba grandísima ventaja a la teoría. Los éxitos alcanzados en obras de composición relativamente sencilla, animaron a los constructores a emprender otras más complejas. De las obras, imitadas unas veces de las de piedra, otras de las de madera, se trató de pasar a otras, con formas propias del hormigón armado, derivadas de sus cualidades típicas. De las estructuras real o aproximadamente isostáticas, de las hiperestáticas bastante sencillas, se quiso avanzar a otras de orden más elevado. Y entonces se hizo más sensible aún el retraso de la teoría.

El arco empotrado y la viga continua sobre varios apoyos eran las estructuras hiperestáticas de más complicado cálculo

estudiadas en los tratados de Mecánica. Si se mencionaban otras más complejas, era sólo para indicar cómo se podría, en general, sobre la base del estudio de las deformaciones, plantear su cálculo, pero no se pasaba de ahí.

La construcción de largos viaductos con altas pilas de hormigón armado trajo el problema de la viga continua sustentada no por apoyos, sino por empotramientos elásticos. Del mismo género, pero todavía más complicados, fueron apareciendo otros problemas, nacidos todos de la cualidad peculiar del hormigón armado, el monolitismo, la continuidad elástica de los elementos estructurales contiguos. En lugar de enlazarse éstos mediante articulaciones, hechas del modo más perfecto posible, para formar figuras geoméricamente indeformables, principio fundamental de los entramados americanos, los miembros de una estructura de hormigón armado se sueldan unos a otros con robustos cartabones, porque a ello conduce lógicamente el modo de construcción y las figuras resultantes no necesitan la indeformabilidad geométrica, porque ésta sólo entraría en juego una vez vencida la rigidez de los enlaces. A menos de quererlo hacer mal, o de adoptar deliberadamente disposiciones especiales, el nudo de enlace es, por esencia, la antítesis de una articulación.

Se llega así a la estructura de mallas cuadriláteras, forma típica del material apto para trabajar *por flexión*. Cláreo es que tal forma puede ser realizada no sólo con el hormigón armado, sino también con el metal, a condición de obtener en los nudos la necesaria rigidez, condición que en general se venía cumpliendo aun en las formas triangulares importadas de América y a trueque de falsear su cálculo. Justo es decir que los primeros ensayos y estudios se hicieron con las vigas metálicas llamadas de pórtico, pero también que ha seguido sien-

do preferida la forma de mallas triangulares en la generalidad de las obras de metal.

La estructura de mallas cuadriláteras, generalmente trapeziales o rectangulares, comprende las más diversas aplicaciones. Cuando los cuadriláteros se yuxtaponen horizontalmente: puentes de arco, puentes de arcadas con cabezas rectas o poligonales; torres de faro, pilas de viaducto, buques, si la yuxtaposición es vertical; y cuando se hace en ambos sentidos, edificios industriales de varios pisos y varias naves. Por degeneración, cuando una serie de elementos es sustituida por el terreno, resultan los viaductos y las cubiertas de varios vanos.

La función crea el órgano: la construcción de muchas obras de esos tipos ha hecho nacer nuevos métodos de cálculo que permiten abordar y resolver satisfactoriamente problemas tan difíciles que años antes ni se hubiera intentado plantear. Y, sin embargo, el tronco de donde han brotado esos métodos era conocido desde mucho antes; todos ellos derivan más o menos directamente del principio del mínimo trabajo elástico. *Entre todas las maneras con que un sólido deformable puede, partiendo de un equilibrio inicial, llegar, mediante sus movimientos elásticos, a otro equilibrio final, elige aquella que implica un mínimo de trabajo, tanto de las causas exteriores como de las fuerzas moleculares interiores.*

Este principio, entrevisto primero por Bernoulli y Euler, sucesivamente por otros varios, siempre en forma intuitiva, fué demostrado por Castigliano en 1873. Como preliminar de la demostración estableció el teorema siguiente: *La derivada parcial del trabajo respecto a una causa, mide el recorrido de ésta.* De aquí puede ser deducido fácilmente el teorema de la reciprocidad de las deformaciones, ya demostrado, aunque de modo muy distinto, por Maxwell.

Al mismo tiempo, sin conocer esos trabajos, Mohr, cuyo nombre descuella entre los de cuantos han hecho progresar la Mecánica moderna, llegó, basándose en el principio del trabajo virtual, a un teorema análogo al de Castigliano, y del que deriva igualmente el de Maxwell. *El trabajo virtual unitario de un sistema de causas independientes, respecto a lugar y dirección determinados, mide el recorrido real que en ese lugar y dirección produce dicho sistema.*

Ni en Alemania ni en Italia se difundieron esos fecundísimos principios y en los demás países quedaron casi en absoluto ignorados. Entrado este siglo, fueron los Ingenieros y Profesores alemanes quienes los resucitaron, puede decirse; supieron apreciar y enaltecer la obra de Castigliano y de Mohr, y caminaron velozmente por la ancha senda tanto tiempo abierta y hasta entonces no aprovechada. Los métodos de cálculo se han perfeccionado y difundido rápidamente. Aplicados a problemas difíciles en obras de gran trascendencia, era importantísimo comprobar experimentalmente sus resultados para juzgar hasta qué punto merecen confianza y apreciar dentro de qué límites de error están.

Esto es lo que de algunos años a esta parte viene haciéndose en las tres formas siguientes. 1.^a, experimentación de modelos en pequeña escala hechos con vidrio, celuloide o materias análogas, y cuyas deformaciones y cargas moleculares pueden ser medidas, unas veces, directamente, otras, mediante la luz polarizada. Sería largo, y nada importa para mi objeto, dar una idea de los ingeniosos y relativamente sencillos procedimientos que para conseguir esas medidas se emplean. 2.^a, experimentación de modelos en escala poco reducida hechos con el mismo hormigón armado, cuyas deformaciones, tanto en el conglomerado como en las armaduras, son valora-

das directamente. 3.^a, experimentación de la misma obra en conjunto y en detalle.

Esta última forma, sólo posible *a posteriori*, es la que menos lugar deja a la duda. Siempre queda alguno, porque lo de verdadero interés, las cargas moleculares, sólo pueden ser deducidas por la multiplicación de las deformaciones por los coeficientes de elasticidad respectivos. El del hormigón varía bastante, efecto de diversas influencias, y aunque se determine, no un valor único, sino los relativos a distintas partes de la obra, mediante muestras tomadas durante la construcción y de idéntica composición, edad, etc., aun así resulta una indecisión que no existe en el de las armaduras.

La experimentación en modelos en mediana escala adolece del mismo defecto; pero permite realizar *a priori*, además de la comprobación del cálculo de la estructura entera o de las partes más interesantes o complicadas, pruebas especiales, forzando las sobrecargas hasta llegar a la rotura del modelo y obtener así una medida de la seguridad de la construcción.

El estudio de modelos en reducida escala y contruídos con material distinto del que ha de formar la obra, permite mayor exactitud en la valuación de las cargas que sufre el modelo mismo, aunque esa precisión se pierde en parte al pasar, mediante la semejanza geométrica y mecánica, a las cargas que la construcción haya de soportar en la realidad. Pese a las dificultades que ofrece, el método es precioso, en especial cuando se trata de proyectos de grandes obras de hormigón armado.

Las experimentaciones realizadas en los últimos años han sido numerosas, particularmente en las grandes y ricamente dotadas Universidades norteamericanas, que prestan extraordinaria atención a los estudios de Mecánica. El enorme des-

arrollo que en aquel país han alcanzado las construcciones gigantescas, tanto metálicas como de hormigón armado, ha permitido también realizar concienzudos e interesantísimos estudios experimentales.

La concordancia entre los resultados prácticos y los teóricos es hoy día satisfactoria; hay errores, pero son prácticamente nulos en lo cualitativo, relativamente pequeños en lo cuantitativo, y siempre inferiores a los cometidos en estructuras antiguas de los tipos más usuales. El adelanto realizado por la Mecánica estructural en lo que va de siglo ha sido de gran valor; pero, aun así, queda mucho por conocer, más, quizá, que lo conocido. Aunque la Ciencia de las construcciones nunca podrá perder su carácter, en gran parte experimental, ofrece enorme campo que explorar en lo que tiene de racional.

En las estructuras planas, es decir, de régimen elástico predominante según dos dimensiones, se camina con suficiente seguridad, que se pierde por completo, salvo en contados casos, en cuanto hay que pasar al régimen elástico triple, el verdadero siempre, en las estructuras sujetas a acciones transversales no despreciables. La Mecánica de tres dimensiones apenas está nacida; aun en los problemas que se llega a plantear bien, las dificultades de cálculo con que se tropieza son hasta el día insuperables. Os citaré dos problemas que me interesan muchísimo desde hace años, y cuyas soluciones aproximadas no me satisfacen. La forma constructiva óptima para cubrir un vano cualquiera es la de una superficie que, apoyándose en el contorno de aquél, sea, en el espacio, respecto a las acciones que ha de soportar, lo que respecto a las contenidas en un plano es un hilo flexible, su funicular. Tal superficie es una velaria relativa al contorno en cuestión, defi-

nida mecánicamente por la condición de equilibrio entre la acción ejercida sobre cada elemento superficial y la resultante de las tensiones desarrolladas en el contorno del mismo elemento. La expresión de este equilibrio en términos geométricos es que la curvatura media en cada punto de la superficie tenga un determinado valor, constante o variable, con la posición del punto. Aun con los valores aproximados de los radios de curvatura no es posible integrar la ecuación diferencial resultante con derivadas parciales de segundo orden. Análogamente, el estudio de una placa sustentada de un modo cualquiera (prácticamente en puntos o zonas distribuidas según dos series de líneas) conduce a otra ecuación diferencial con derivadas parciales de cuarto orden. Y estos son problemas relativamente sencillos; otros muchos ofrecen dificultades más insuperables, no de procedimiento, sino fundamentales, de planteo.

No faltará quien sostenga que así como vivió la humanidad tantos siglos sin saber Mecánica, bien podrá seguir viviendo con la que ahora sabe. Afirmar esto equivale a resucitar el viejo mote *nec plus ultra*. Si la Mecánica se estancara, más o menos pronto alcanzaría un límite insuperable el progreso de las construcciones, por muy poderoso impulso que le prestaran nuevos materiales y nuevos recursos de orden puramente experimental.

El mote de nuestra época es el contrario: *plus ultra*. El progreso avanza de un modo irresistible, aunque no constante; si a veces se detiene, es sólo para acumular energía con que saltar después ganando mayor altura. En otros tiempos, muy contados eran los hombres dedicados al estudio; hoy para cada ciencia hay una pléyade que incansablemente labora por el progreso, aportando cada cual, en la medida de sus fuer-

zas, unos granos de arena. Pocos o insignificantes los de unos, muchos o grandes los de otros, todos se suman en un conjunto que crece sin cesar y forma una oleada de incontrastable energía, que vence cuantos obstáculos encuentra.

CONTESTACION

DEL EXCMO. SEÑOR

D. AMÓS SALVADOR

SEÑORES:

Creía yo que, al contéstar recientemente y por vigésima vez un discurso académico, sería el último; porque mi edad y mi salud me daban derecho a descansar en esas tareas, aunque fuera para mí dolorosísimo el ir cada día renunciando, y para siempre, a cosas que, habiendo sido manifestaciones de vida, demuestran que ésta se acaba, cuando se las abandona. Pero está visto que he de morir satisfaciendo los deseos de aquellos queridos amigos que me hacen el grandísimo honor de designarme para tales menesteres.

En el día de hoy lo hago con singular complacencia por lo que os iré diciendo en el curso de este lacónico trabajo; pero, al empezarlo, no puedo ni quiero excusar el paso por la triste amargura de recordar a aquel compañero perdido, a don Vicente Garcini, que fué hace más de medio siglo discípulo mío, con el que he conservado durante ese largo período una amistad entrañable, al que mi singular afecto quisiera dedicarle algunas frases, que siempre me parecerían pocas y, sobre todo, frías y desatinadas, por calientes y cariñosas que fueran.

Afortunadamente, el nuevo académico ha dicho de él lo

bastante para que pueda yo limitarme a llorarlo en nombre de la Academia, y singularmente en el mío.

Viene a reemplazarlo otro compañero, don Juan Manuel de Zafra, de quien, por variar algo mi copiosa costumbre en estos actos, no haré una biografía reducida, como de ordinario se hace, a los perfiles más salientes de su figura, sino que lo iré definiendo, por lo que diga, aunque para vosotros sea completamente innecesario, puesto que, al elegirlo académico, conocíais bien la persona y sus trabajos de ingeniería, así como sus notabilísimas obras publicadas.

Me lisonjea hoy la esperanza de poder cumplir mi cometido, mejor diría salir de mi apuro, con una gran facilidad, porque no pienso hacer un discurso científico, sino anecdótico, de recuerdos de la vida; y si para lo primero, que reclama cantidad de pensamiento, algún trabajo y mucho esmero, me hallo sin fuerzas, para lo segundo, desgraciadamente, me encuentro pletórico, repleto de materia.

Es indudable que debe considerarse como más importante, más fundamental, la ciencia pura, la que se dedica a la investigación, ya para acrecentar los dominios de la razón, ya para arrancar a la Naturaleza la infinidad de sus secretos, de los que, conociendo ya tantos, no son, sin embargo, sino una ínfima parte de los que se guarda; considerando como cosa secundaria las aplicaciones de la ciencia a las necesidades de la vida. No sé yo si pueden considerarse aisladamente con razón suficiente, porque en realidad son la misma cosa. En esta Academia, por ejemplo, donde tanto abundan los que dedican su vida entera a los trabajos de investigación en la ciencia pura, sería difícil señalar ninguno que no hiciera de ella aplicaciones; y del mismo modo no cabe imaginar acrecentamientos industriales ni de otra índole sin conocimien-

tos científicos, muchas veces de la más encopetada categoría.

En el común sentir, vale más lo último que lo primero, porque realmente se palpa esto, y lo primero no. Sin la aplicación de la ciencia a la Astronomía, no conoceríamos el planeta Neptuno; si solamente supiéramos que existían unas ondas del género de las luminosas, a las que llamamos hertzianas, porque Hertz las descubrió, el descubrimiento sería interesantísimo y de los que ennoblecen a la humana inteligencia; pero, si de ahí no pasáramos, podríamos llamarle híbrido en el sentido de que no dejaría descendencia, en tanto que, por haber descubierto Marconi el organismo apropiado para hacerlas sensibles, podemos hablar instantáneamente con todos los puntos de nuestro globo, sin intermediarios metálicos en determinadas direcciones, porque somos ya poderosos para enviarlas y servirnos de ellas en direcciones infinitas; y aplicando la ciencia, tenemos agua y luz en nuestros hogares; máquinas de la más variada índole en nuestros talleres, que facilitan y dignifican el trabajo; industrias cada día, nuevas unas y otras perfeccionadas y florecientes; por la ciencia andamos a grandes velocidades por la superficie de la tierra, navegamos tanto por la superficie del mar como por debajo de ella y volamos por el aire: y fijamos esos movimientos y los reproducimos en el cinematógrafo, así como los sonidos en el fonógrafo; y, en suma, sólo *parece* que la Humanidad progresa, cuando los progresos de la ciencia pura se revelan aplicándose a las necesidades de la vida.

Pero, sea de esto lo que quiera, lo cierto es que sin ciencia pura no hay que pensar en sus aplicaciones, y que primero es ella, después su popularización, para que, saliéndose de la esfera reducidísima donde se mueven los sabios, pueda ser conocida y utilizada por la masa general de la humanidad en-

tera; y, por último, vienen las aplicaciones de esos conocimientos a la vida real, ensanchándola, intensificándola, dignificándola y haciéndola cada día más amable y más fácil.

Pues, siendo esto cierto, yo no puedo negar ni quiero omitir mi resuelta predilección por los dos últimos aspectos. Algunas veces me he dedicado a la investigación científica, y pudiera citaros, en demostración de ello, algo como el estudio, desde ciertos puntos de vista, de la germinación de las semillas de las vides americanas resistentes a la filoxera, que nada tiene que ver con los trabajos de mi profesión, y dentro ya de ésta, por ejemplo, la manera de actuar el sulfato de sosa en los morteros, que nos volvía locos en Logroño; mas pronto me convencí de que acaso pudiera servir para dirigir ese género de trabajos; pero que de ningún modo había nacido para empresas que reclaman una paciencia consumada, cuando es característico en mí el ser impaciente en el más alto grado.

A la popularización de la ciencia y a sus aplicaciones me ha llevado siempre mi afición. Atribuyo lo primero a la veneración que he sentido siempre por aquel insigne Echegaray, a quien cada día admiro y recuerdo más, de quien ya no sé hablar sin citarlo hasta con pesadez, que empezó por ser mi maestro, también hace ya más de medio siglo, y no ha dejado de serlo jamás en ese extenso período, y que, en mi sentir, no ha tenido par en el mundo como popularizador de la ciencia. Y a lo segundo me ha inclinado mi propia carrera, puesto que esta ingeniería no es más que las aplicaciones de la ciencia a la construcción, casi pudiera decirse que es la Mecánica racional aplicada a las construcciones.

Desde que empecé a practicarla (y ya os he dicho que este discurso sería un cuento) me convencí de la necesidad que te-

nemos en España de dedicar a esta materia una atención privilegiada.

Dejo aparte, porque sería inacabable, el exponeros la multitud de casos en que, ya cuando se trata de las ordinarias construcciones, ya de conducir aguas por canales o tuberías, tropieza uno con los coeficientes que en todo momento se utilizan, los cuales, si bien una larga experiencia invita a emplearlos con una gran confianza, también es innegable que muchos de ellos se han deducido de experiencias muy reducidas y que sería conveniente multiplicarlas concienzuda y sistemáticamente, siendo de notar que ni en aquellos países que los han determinado, han repetido tan interesantes investigaciones, que en ninguno se le da la importancia debida y que en España no hay para qué decir que en esa materia no se ha hecho absolutamente nada.

¡Cuántas veces habré dicho yo en la práctica de mi carrera que si alguna vez llegaba a ser ministro de Fomento (cosa que me parecía imposible) lo primero que haría es formar comisiones reglamentadas, para que ordenada y sistemáticamente hicieran las experiencias necesarias al objeto de que esos perfeccionamientos se obtuvieran!

Más tarde vino a fortificar esas ideas el insigne Dupuit, que tiene para mí una característica que lo distingue de todos los ingenieros cuyas obras conozco, a saber: que él es el que da a lo suyo el carácter más de ingeniero que cabe imaginar. Nada diré de su conducción de aguas, porque no se liga tanto con lo que voy a decir como su tratado sobre el equilibrio de las bóvedas, singularmente en los puentes de fábrica de grandes luces, en el cual desarrolla una idea que es fundamental para el estudio de toda obra de Ingeniería.

Examina primero, con la mayor atención, los desconcha-

dos, desportillos, grietas y deformaciones que las bóvedas experimentan en el acto del descimbramiento, cuando la obra queda por completo entregada a sus propios esfuerzos; y después, dando a los planos de junta de las dovelas de clave y de los riñones una forma y refuerzos especiales, obliga a que las fuerzas, que ya sabe que actúan en aquellos lugares, pasen por puntos determinados y fijos, con lo cual ya no tiene nada de arbitrario el cálculo y construcción de la curva de presiones.

Y esto, que tiene apariencias de baladí, yo lo tengo por genial, porque no cabe imaginar nada más sensato y natural que ver cómo se destruyen las obras para averiguar cómo deben calcularse, construirse y conservarse. Y siempre que he tenido que calcular bóvedas, he repetido aquello de que si llegara a ser ministro de Fomento, haría que aquella comisión o comisiones de que acabo de hacer mérito tendrían por una de sus misiones fundamentales la de *romper* bóvedas, destruir obras, en suma, construyéndolas, no para que vivan, sino para que mueran; no para asegurarles una larga duración, sino para sacar de ellas el fruto que debe esperarse de su estudio detenido y sistemático, variando para ello los materiales, su modo de cementarlos y de colocarlos en obra, el tiempo que se deje para el fraguado, los espesores y las circunstancias todas que concurren en la obra, sometiénolas a esfuerzos de la más variada índole, desentrañando los efectos y sacándoles implacables, con a sus juguetes los niños, las tripas al aire, quiero decir al examen.

Ya volveré luego sobre esto para que se vea que no lo olvidé en su día; pero no quiero ahora perder el hilo de lo que vengo exponiendo.

Si fuera sólo que los Estados, y no hay para qué decir

que el español más que otro alguno, no dedican a estos estudios la atención que por su grandísima importancia merecen, ni gastos que deban tomarse en consideración, cuando pueden ser causa de economías enormes, sería menos malo, aunque siempre lamentable; lo malo es que no ayudan nuestros Gobiernos a ninguno de estos ensayos, y lo que es aún peor, que oponen obstáculos y resistencias que anulan toda iniciativa.

Recién salido de la Escuela, fuí destinado a Logroño, y tropecé, por fortuna mía, con un jefe y un compañero, que eran dos notabilísimos ingenieros, que me enseñaron a mí a serlo más que los años de carrera, y para los cuales tengo la mayor suma posible de *gratitud imaginable*. Eran don Ricardo Bellsolá y don Cesáreo Moroy; este último, además, insigne matemático. No acabaría de contar las cosas que me enseñaron y las novedades que tenían en cartera, dignas de la mayor consideración; pero me limitaré a citar dos: una que sirve para demostrar los obstáculos con que toda novedad tropieza, y otro porque, demostrando esto mismo, me pone en contacto con el tema del discurso de nuestro nuevo compañero, tan digno de elogio como habéis visto y celebrado.

Se conoce en varias provincias con los nombres de ramblas, torrenteras, etc., y en Logroño con el de yasas, lo que tiene por verdadero nombre el de conos de deyección. Y no hay para qué decir que, por su manera de formarse, cuando son atravesados por vías de comunicación, están éstas a menudo invadidas por los materiales, exigiendo grandes gastos de conservación, y que las obras de fábrica que son indispensables, al atravesarlos, están destinadas a ver paulatinamente disminuídas sus luces, más tarde obstruídas, y pasando al cabo los acarreos por encima de ellas. ¿Hay cosa más sencilla,

económica y natural que el pretender atravesarlas en túnel? Pues por más que hicimos preguntas, consultas, proyectos y excitaciones a los compañeros de la que entonces se llamaba Junta Consultiva de Caminos, Canales y Puertos, ni siquiera nos contestaban. Al fin, he visto ahora que se ha hecho un ensayo con resultados admirables; pero ¡cuánto tiempo se perdió!

¿Qué mal había para el tránsito público? ¿Qué peligro para los viandantes? ¿Qué gastos apreciables hacían unas obras destinadas a economizar grandes caudales? Si en aquella Junta estaban los ingenieros más eminentes y prácticos, ¿había más que habernos dado consejos, instrucciones, recomendado condiciones y experiencias que aseguraran el buen éxito del ensayo o anulasen los daños que se temieran? ¡Pues nada!

El que ahora voy a citar es muy curioso. No sé si recordaré con exactitud lo que digo, que no puedo rectificar, porque aquellos queridos compañeros murieron hace muchos años; pero estoy cierto de que en el fondo la narración será exacta.

Había que construir dos obras de fábrica: dos puentes de doce metros de luz para atravesar dos barrancos, y salían carísimas porque las canteras disponibles se hallaban a una distancia muy considerable, en tanto que resultaban baratísimas si se construían de hormigón, utizando el canto rodado que se tenía al pie de obra. Y así se proyectaron; pero ¡qué carrera de baquetas corrieron los proyectos! ¡Cuántas dificultades se pusieron y de cuántas maneras se procuró disuadir al autor del proyecto (que si no recuerdo mal, fué Bellsolá) para que renunciara a ese propósito! Se decía, entre otras cosas, que sólo se habían construído de hormigón algunas tajeas o pon-

tones de escasisima anchura; pero que se consideraba arriesgadísimo extenderlo a puentes de 12 metros de luz. Cierto que pudiera decirse que aquellos puentes no estaban bien proyectados, porque se les había aplicado la teoría ordinaria de los puentes de fábrica, con lo cual un constructor experimentado quedaba tranquilo respecto a la estabilidad, sabiendo que los espesores pecarían de excesivos, pero no de deficientes, que los comprometieran. Reconozco que a esa manera de calcular podrían hacerse objeciones muy racionales, porque, en suma, no eran puentes que hubieran de vivir por virtud de sus despieces y de las resistencias ordinarias a los esfuerzos que se suponen, sino monolitos, cuando el fraguado de los morteros fuera perfecto; piezas, en definitiva, de una u otra forma, apoyadas por sus extremos. Pero ¿había más que señalar un plazo, aconsejado por la experiencia de los que la tuvieran más copiosa, para dar lugar al fraguado, de suerte que ni se perdiera en balde un tiempo que pudiera utilizarse, ni exponerse a que por la impaciencia se derrumbaran obras llamadas a durar siglos? ¿Había más que imponer otras condiciones, y singularmente las de prueba de resistencia antes de darlas al tránsito público? Se autorizaron, al cabo; pero casualmente le tocó hacer una visita de inspección a nuestro llorado e insigne compañero, al sabio en tan diversas disciplinas como era don Eduardo Saavedra, y mantuvo con aquellos ingenieros el lacónico diálogo que sigue: —¿Insisten ustedes en construir esos puentes de hormigón? —Sí, don Eduardo. —¡Valor es! — ¡Frase que, viniendo de quien venía, no era ciertamente para disipar recelos e inspirar confianza!

Agréguese a esto, y vaya de cuento, que, al descimbrar esos arcos, sobrevinieron unas lluvias y se vió que las aguas, que no debieran pasar por un macizo de hormigón, en el que

servía de cementación, además de la cal grasa, la hidráulica, lo atravesaban de parte a parte, como si se hubiera tratado de cantos rodados o grava colocados en seco. No cabe expresar la contrariedad que esto produjo en el autor del proyecto y en todos los funcionarios de obras públicas, empezando a temer que tuvieran razón los que desconfiaban de ellos, pensando que podrían haber olvidado algunos detalles que fueran fundamentales, y temiendo ya razonablemente un fracaso que, dados los antecedentes, sería de mucho ruido. No fué así, sin embargo. Afortunadamente, siguieron las lluvias, siguió la atención puesta en su manera de actuar, se vió que la impermeabilidad aparecía, renacieron las esperanzas, se hizo, al fin, la obra impermeable, y el triunfo fué completo. Ahí están los puentes, gozando de una gran estabilidad, haciendo excelente servicio, demostrando que pueden producir muy grandes economías en las obras públicas y reclamando el estudio que sea preciso para perfeccionar el modo de calcularlas, construirlas y probarlas; *rompiéndolas*, como antes decía, porque si es verdad que sin ciencia no cabe hacer de ella aplicaciones, muchas veces, sin ciertas aplicaciones y experiencias, no tiene dónde asirse para edificarse y extenderse la ciencia pura.

Posteriormente se han construído en aquella provincia otros varios, dos de ellos de tres y de cuatro arcos de catorce metros de luz cada uno, sirviéndoles a todos de modelo en lo fundamental los dos que acabo de mencionar. Y vale la pena de hacer constar que los cuatro arcos se voltearon en cinco días.

Ya se ve cómo los puentes de hormigón, ya construídos con mortero ordinario e hidráulico como los primeros, ya con cemento como los últimos, me abren el camino del hormigón

armado, que tan contenido se halla en el tema del discurso que acabáis de aplaudir y del que sólo os diré algunas palabras.

Quiero antes deciros unas cuantas que, de una parte demuestren que no fuí olvidadizo de mis conocimientos cuando me vino a la mano la oportunidad de servirlos, y confirmen de otra el carácter anecdótico de este cuento, que os he prometido al principio.

Llegó, en efecto, mi inesperada toma de posesión de la cartera del Ministerio que entonces se llamaba de Agricultura, Industria, Comercio y Obras Públicas, y no hay para qué decir que, habiendo durado en ella sólo tres semanas, no tuve tiempo de hacer cosa alguna de verdadero provecho; pero más tarde vine a ser ministro de Fomento, y, como esperaba durar algún tiempo, pude ya pensar en lo que desde joven me tenía prometido.

Al efecto, busqué a mí siempre maestro y siempre querido y admirado amigo don José Echegaray, al cual expuse mi pensamiento, expresado en notas (que hace poco tiempo rompí, considerándolas ya inservibles), que daban a conocer la Comisión, el número de sus individuos, la división en secciones, materia destinada a cada una, y condiciones que habían de regular las variadas experiencias que correspondían a cada una, con detalles que no son del caso ni interesan ya a nadie.

Juzgo inútil decir que aquel hombre tan bueno se puso, desde luego, a mi disposición, que se llevó las notas, que me prometió pensar sobre ello, que en el acto, a tenazón, con la rapidez que correspondía a aquel entendimiento tan asombroso y excepcional, me hizo ya observaciones atinadísimas; pero lo que me dijo, al separarnos, es lo que lleva el toque

anecdótico en este diálogo: —¿Sabe usted, amigo mío, que no acabo de entenderlo, a pesar de lo mucho que nos hemos tratado? —¿Por qué, don José? —¡Porque, como me envía todo lo que escribe, y me consulta sobre muchas cosas, tenía aprendido que tiene usted afición a muy variadas disciplinas; pero a lo que creía yo que no le tenía afición ninguna es a nuestra carrera! Y ahora me encuentro con que, en ocasión que por su edad y por sus condiciones, no volverá jamás al servicio del Estado, ni pensará ya más nunca en hacer obras públicas ni particulares, habla de la ingeniería con un entusiasmo y un detalle propio de jóvenes que pensarán vivir del ejercicio de su profesión durante toda su vida. —Si hubiera usted dicho, mi querido don José, *competencia*, en vez de *afición*, habría acertado de medio a medio; pero en lo de la afición, ¡no diré que se equivoca, por respeto, contentándome con decir que *dormita!*

A los cinco meses de ministro de Fomento caí, y es claro que conmigo cayó la Comisión investigadora, mis propósitos, mis esperanzas y mis ilusiones; y lo que es peor, a estas alturas, para siempre.

¡Volvamos a las obras de hormigón!

¡Imposible exagerar la manía que se apoderó de mí en aquella feliz edad juvenil, que antes recordaba, relacionada con el estudio de las materias que sirven de cementación! No diré yo que pensara que se sabía poco, porque no en balde se venía construyendo hacía siglos y examinando los constructores las obras y las maneras de hacerlas; pero cuando veía en mi propia experiencia que con sólo manipular yo el mortero ordinario, en las condiciones marcadas por los pliegos de condiciones, para formar las tabletas que servían para el estudio de los efectos del sulfato de sosa, el fraguado se

realizaba con una rapidez increíble y desconcertante; cuando veía que obras de la época de los Romanos habían resistido la influencia de las fuerzas físicas durante siglos, y resistían ahora, como monolitos, a las herramientas del trabajo de los obreros y aun a los cañones de la artillería; cuando veía trabajar el porland a cuadrillas inglesas, procurando ocultar un secreto que no lográbamos descubrir, que no he visto después practicado ni por otros ingleses, ni por extranjeros ni nacionales, ni leído en ninguno de los libros que tratan de la materia, y que conseguían, no sólo hacer una arenisca artificial, cuyos trozos rotos a los cuarenta años no se diferenciaban en nada de las areniscas naturales, sino que, manejando las mismas arenas y aguas que nosotros, a nosotros se nos plagaban las obras de manchas blancas de sulfato de sosa, y a ellos no; cuando veía que nuestras discordias civiles nos presentaban casos de puentes volados, en los que se veían cosas tan inverosímiles como el de un pedazo de pila sosteniendo más de medio arco, por haberse convertido en una pieza rígida empotrada en el suelo; cuando veía las luces que se alcanzaban con bóvedas tabicadas de ladrillo y yeso, construídas sin cimbras, en Cataluña y en Logroño, y lo que resistían en edificios ruinosos escaleras de igual construcción y hasta de yeso solo; cuando veía todo esto, me afirmaba en la creencia de que, aun cuando se supiera ya mucho, no se sabía lo bastante, no se había dedicado la esmerada atención que reclama a un asunto del que debieran obtenerse resultados inesperados, acaso, y de todas suertes maravillosos.

Y vino a darme la razón el incremento rapidísimo que obtuvieron las obras de hormigón armado, objeto del discurso de nuestro nuevo compañero.

- ¿Qué son, en suma, estas obras? Cementos combinados

con areñas, que forman morteros, y con gravillas o gravas de diversos tamaños, que forman hormigones, más o menos finos y de condiciones muy variadas, que se mezclan, además, con el hierro o con otras materias que sirvan, o para dar a la obra la consistencia necesaria durante el tiempo empleado en fraguar, o para darle resistencia y estabilidad antes y después del fraguado, puesto que no basta hacer una pieza rígida, sino proporcionarle las condiciones de rigidez que reclamen los esfuerzos a que haya de estar sometida.

Y es digna de notarse una circunstancia especialísima que ha concurrido en el desarrollo de estas construcciones. La de que el instinto universal previó, desde los primeros momentos, el portentoso desenvolvimiento que habían de lograr, y el de los constructores se ejerció de manera pasmosa, arriesgándose en empresas de las más atrevidas y obteniendo resultados que produjeron verdadero asombro. Vinieron también lamentables fracasos y sentidas catástrofes, ya porque la osadía de los constructores llegara a la temeridad, ya porque no se conocía debidamente el modo de calcular los espesores de los elementos constructivos en armonía con las fuerzas que soportaban, ya, en fin, por causas fortuitas, no imputables a nadie y de las que a nadie podía hacerse responsable; pero nunca se creyeron las naciones obligadas a oponer dificultades que retardaran el progreso en esta materia, pensando que bien podía pasarse por algunos riesgos, y hasta exponerse a verdaderos peligros personales, a cambio de los beneficios que de tales invenciones se esperaban. Y así ha sido, en efecto, superando mucho los resultados obtenidos a las mayores esperanzas concebidas. Esa nueva manera de construir, por la economía que produce y porque puede adaptarse a las necesidades constructivas del linaje más variado, está amenazan-

do, no ya con hacerse dominante, sino exclusiva, según vayan viniendo los sucesivos perfeccionamientos.

Los ya utilizados se refieren tanto al conocimiento y distribución de los materiales, como a la mano de obra y al cálculo de los espesores, siendo este último lo más interesante para el ingeniero, como ahora diré, aunque no lo sea para la obra. Porque nadie osará decir que en éstas es una u otra cosa superior en importancia a las demás, cuando todas se necesitan, compenentran y ayudan para el fin común, que de otro modo no se obtiene. Con malos materiales o mal distribuidos, por ejemplo, no podrá haber obra buena, por buenos que sean todos los demás elementos que en ella concurran. Y lo mismo sucederá si la mano de obra es mala o el cálculo de los espesores. Hágase lo que se quiera, ni una obra mal calculada puede ser buena, ni lo será por la sola bondad de los cálculos bien hechos; pero si para la obra puede decirse que todo es de igual categoría, no sucede lo mismo para el ingeniero, a quien se encomienda la dirección de todo, porque a él se le hace responsable de todo, aunque no puede ser igual la responsabilidad que por todo le alcance. Nadie podrá pretender que examine y pruebe uno por uno todos los materiales de tan variada índole y tantos como en determinadas obras se emplean, y cuyo examen tiene necesariamente que recaer en manos subalternas; nadie pretenderá, asimismo, que vigile en todos los minutos, abandonando otros deberes de mucha mayor consideración, la mano de obra, y que esté a la vez en todas partes, cuando también para ello hay funcionarios de otras categorías; nadie exigirá de ellos provisiones que pudieran tener los que viven al pie de obra y no los que hacen vida de dirección y, en suma, de gabinete; pero lo que es, sin duda alguna, del ingeniero director, en lo que adquiere

una responsabilidad, que no comparte con nadie, es en el cálculo de la estabilidad de lo que proyecta. No calcular o hacerlo mal podrá tener todavía disculpa en los datos equivocados o en errores que son propios de los hombres; pero no es fácil quedar del todo bien; en cambio, cuando pueden entregarse los cálculos al examen de los más entendidos y exigentes, todo lo demás es menos. No se entienda por esto que todo puede calcularse, porque no todo se sabe calcular.

Y en este orden de ideas los adelantos han sido tan rápidos y tan notables, que cabe tacharlos de portentosos y aun de inefables. Obras cuya contextura hacía temer que no se prestara a las aplicaciones del cálculo matemático, en forma que diera a los constructores perfecta confianza, han llegado a ser calculadas de manera admirable.

Y reconociendo todo eso y admirándolo como el que más, acaso porque los años no son aptos para deshacer antiguas terquedades, sino para agravarlas, todavía digo que las teorías, para poderse desarrollar con amplitud y seguridad en determinados sentidos y con ciertas condiciones, necesitan apoyarse en experiencias que merezcan verdadera confianza, las cuales sólo puede realizarlas el Estado; y debe, además, realizarlas, no sólo por interés de la ciencia, sino por las economías que pueden reportarle gastos tan, por todos conceptos, reproductivos.

No se vaya a creer que yo ignoro que, aun en España, en las Escuelas Especiales, y singularmente en la de Caminos, se tienen laboratorios, donde con fondos del Estado se hacen muchos ensayos, estudios, análisis y trabajos, en fin, encaminados a averiguar o comprobar resistencias de cementos y de hormigones, adherencias de éstos con los hierros y otros conocimientos de la mayor importancia para el debido empleo

en obra de estos materiales, aislados o combinados. Tampoco ignoro que hay en el extranjero Comisiones especiales dedicadas al estudio que vengo examinando; pero falta aún mucho por hacer y no se hace lo bastante; pero el demostrar esto y la indicación de lo que debiera hacerse y cómo debiera hacerse, exigiría un tiempo de que no dispongo, y una labor a que he renunciado desde las primeras palabras. Aparte el que nadie creo que dude sobre la bondad de esto, para que la Mecánica racional por un lado, y el análisis mecánico por otro, se ejerciten de manera fructuosa. Nótese, además, que no sólo me refiero a los hormigones armados, sino a los hormigones sin armar y construídos, no ya con cementos, sino con cales hidráulicas y ordinarias, de los cuales espera tanto la construcción como ellos ser atendidos en lo que al cálculo de resistencia concierne.

Y en esa tarea que venía examinando, a los nombres ilustres y respetabilísimos del extranjero podemos citar con orgullo muchos nuestros, tanto dedicados a enseñar con facilidad lo ya sabido, como enseñando lo descubierto por ellos mismos. Tal sucede, entre otros, con el marqués de Echandi, don José Rivera, el señor Peña, verdadera especialidad en quien se fijan todo género de esperanzas, y el señor Zafra, a quien cito el último por haber de detenerme en él algunos minutos, ya que a él esta sesión se le dedica.

El pequeño extracto biográfico que, por costumbre, se hace en estos actos del académico recipiendario, puede reducirse aquí a su afición, de nacimiento, a la Mecánica, y al estudio constante de ella con aplicación al hormigón armado.

Hijo de un ingeniero de Caminos, a quien conocí en la Escuela, y que acabó la carrera el año 1866, con el número

uno, acabó la suya en 1892 con el mismo número, entre treinta y ocho.

En el puerto de Sevilla tuvo ocasión de trabajar y estudiar mucho en cosas de verdadera importancia, y en 1898 comenzó con el hormigón armado, que todavía se mantenía de recetas. En 1902, después de ejecutar varias obras, a costa de muchas zozobras, ganó el concurso para la construcción de cubiertas y pilares del Depósito del Lozoya, figurando su proyecto, desde los primeros momentos, en primera línea sobre los demás que se autorizaban por las más acreditadas firmas.

Poco después, en otro concurso para una obra particularmente difícil, venció a los constructores más afamados, españoles y extranjeros, y llevó a cabo la primera obra, de verdadera importancia entonces: un embarcadero de gran altura, sujeto a fuertes cargas dinámicas, expuesto al choque con grandes buques y sometido a violentas corrientes durante las avenidas del Guadalquivir.

El buen éxito obtenido le proporcionó la ejecución de otro embarcadero y de varias otras obras, entre las cuales merece especial mención un puente para ferrocarril con tramos rectos que, durante varios años, fueron en su género los mayores del mundo, y que se han repetido en otros muchos puentes. Todas estas obras le hicieron prestar atención esmeradísima al estudio de la Mecánica.

Vuelto a la Escuela del ramo como profesor de Puertos, en 1908, ha construído poco; pero proyectado mucho y estudiado más que nunca la Mecánica.

En 1910 fundó la enseñanza del hormigón armado en dicha Escuela, publicando en seguida la primera parte del libro denominado *Construcciones de hormigón armado*, que se llamó

Mecánica, siendo de desear que no se retarde más la segunda parte, intitulada *Aplicaciones*, que tiene prometida.

En la imposibilidad de citarlo todo, no puedo excusar de enaltecer su tipo de presa de embalse, con formas especiales de pantalla y contrafuertes, que han sido muy imitadas después en construcciones análogas.

Publicó en 1912 su *Application of reinforced concrete to hydraulic works*, que presentó en el Congreso de Navegación de Filadelfia, y a principios de 1913 *Los métodos de cálculo derivados del trabajo elástico*.

Finalmente, reuniendo todos los trabajos y problemas resueltos, dió a todo hilación y unidad de criterio, produciendo en 1915 y 16 su notable obra de consulta titulada *Cálculo de estructuras*.

Como premio de toda esa luminosa labor le fué concedida la Gran Cruz de Alfonso XII, el primer premio otorgado al Cuerpo de Ingenieros de Caminos, y el nombramiento de esta Academia, que lo designó como compañero, honrándose mutuamente.

Pero ¿puedo yo desmenuzar ahora el discurso del académico recipiendario, resumen hecho de mano maestra de lo que de la materia se sabe, cuando veinte veces he dicho que debe en absoluto respetarse, porque, aun elogiándolo, parece que se alecciona?

Podría, sí, como muchas otras veces he hecho, tomar un tema derivado del discurso, sin ser el discurso mismo, y desarrollarlo como lo haría en este caso con verdadero entusiasmo, respecto de algunos conceptos que entran de lleno en mis más arraigadas aficiones; pero, aparte el que ya tomaría esta contestación proporciones indefendibles, perdería el carácter que quiero darle.

¡Con cuánto gusto, por ejemplo, ampliaría ciertos conceptos que parecerían contradictorios con lo que dejo dicho, sin esos esclarecimientos! Acabo de decir, en efecto, y lo confirmo, que los directores de obras, arquitectos o ingenieros, necesitan ya poder presentar el cálculo de espesores, tanto cuando se trata de armaduras o puentes de grandes luces, como de cimbras, más o menos difíciles y hasta de los más sencillos andamiajes; pero ¿quiere esto decir que ha de cerrarse el paso a la inspiración, al instinto, al sentimiento y, finalmente, al genio? ¡De ninguna manera, y si eso se hubiera exigido siempre, la construcción estaría en mantillas! No se necesitaría menos de un libro, tan voluminoso como interesante, para indicar los maravillosos monumentos que han asombrado a los diversos pueblos en todas las épocas de la Historia, y que han sido construídos sin fórmulas ni cálculos por esos poetas de la Arquitectura y de la Ingeniería, que no han desaparecido, por fortuna, de la tierra, que vivirán en ella de modo perdurable, y que, por ser genios, logran desenredarse y desasirse de la urdimbre de la Mecánica y del Análisis para llevar, al vuelo, sus portentosas concepciones constructivas y sus inspiraciones arquitectónicas, con la categoría de obras maestras, hasta las más empinadas cimas del arte. Sería doloroso el cortar esas alas; pero sin insistir en esto, porque ya no es tiempo, tengo que confirmar con el nuevo compañero que el progreso de la construcción exige cada día más imperiosamente el de la Mecánica, a lo que me permito añadir que el Estado debe ayudar con su esfuerzo, para conseguirlo, a los hombres de ciencia que a cultivarla se dedican.

Y dejo ya el trabajo porque vale más que me regocije con este día de juventud, ¡aunque sea fingida!

Digo de juventud, porque al recordar hoy a mis maestros,

condiscípulos y compañeros, barajando los nombres de Eche-
garay, Saavedra, Bellsolá, Moroy, Garcini, Echandia, Rivera,
Peña y Zafra, me parece que trato con hijos míos, unas veces,
y que me hallo, otras, al lado de mis condiscípulos, recibien-
do las lecciones de nuestros citados profesores. ¡Es volverse a
aquellos tiempos y vivirlos; es rejuvenecerse, que es la más
amable de las irrealizables ambiciones; es, en suma, pasar un
día feliz! ¿Que es pura ilusión? ¡Pero es vivir! ¡Se vive de aca-
riciar ilusiones, como por perderlas se muere!

De lo que me voy persuadiendo con los años, y esto sí
que no es ilusión, es de lo mucho que queremos los viejos.
Porque antes tenía predilección por mis compañeros de ca-
rrera; pero hoy, y sobre todo en esta casa, y desde el sitio
que en ella ocupo, comparto mi cariño con todos los demás.

¿Puedo yo haber tratado de ciencia aplicada a las cons-
trucciones sin tener en la mente, para admirarlo, a nuestro
querido general Marvá, que no sólo ha enriquecido la ciencia
en ese concepto, sino que la ha avalorado con su palabra, po-
niendo a ese servicio sus condiciones de profesor insupera-
ble? ¿Puedo dejar de admirar, asimismo, a los que profesan
las demás ingenierías, siendo misión de todos ellos el aplicar
la ciencia a las necesidades de la vida, tan apreciables y dig-
nas de encomio como las que se derivan de la construcción?
¿Y puedo dejar de hacer lo mismo con los catedráticos, con
los que estudian la ciencia por la ciencia, cuando reconocí al
principio su primacía? Así es que, al dar la bienvenida en
nombre de la Academia al nuevo académico, al abrirle los
brazos, en su nombre y en el mío, mejor que un compañero
más, veo uno más a quien querer y a quien pedir correspon-
dencia.

¡Bien venido!