

SERIE

ENSEÑANZA
DE LA
INGENIERÍA

REFLEXIONES ACERCA DE LA FORMACIÓN Y ENSEÑANZA DEL INGENIERO EN EL ÁMBITO DE LAS DISCIPLINAS TECNOLÓGICAS

Francisco Millanes Mato.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

*Catedrático de Estructuras Metálicas y Mixtas. E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
IDEAM S.A.*

RESUMEN

Las disciplinas incluidas dentro de lo que podríamos llamar Tecnología de las Estructuras ocupan un papel fundamental, a modo de dovelas de clave de un arco, en la solidez de la formación estructuralista de los ingenieros. En este trabajo, el autor reflexiona sobre transformaciones docentes y metodológicas que se plantean en nuestros días como consecuencia principalmente de:

- la continua evolución y desarrollos en las tipologías estructurales y métodos constructivos;
- la creciente integración de las tecnologías del Hormigonado y el Acero, donde las Estructuras Mixtas constituyen un fructífero punto de encuentro de enorme potencialidad;
- el inevitable desarrollo de un ámbito tecnológico y normativo europeo común, plasmado ya en los trabajos de los Eurocódigos;
- las nuevas exigencias en la formación del ingeniero, surgidas como consecuencia del recurso a los ordenadores como auxilio del cálculo y diseño de las estructuras.

ABSTRACT

The subjects included in what might be called the Technology of Structures form the keystones of the training of engineers. In this articles, the author considers the changes in teaching and in methodology imposed mainly by:

- the continuous development of structural models and construction methods,
- the growing combination of the technologies of concrete and steel, where mixed structures offer great potential,
- the inevitable development of a common European technological arena and the rise of Eurocodes.
- the new demands in training brought about by the use of computers both for calculation and in design

Devolver a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de junio de 1997.

Recibido en ROP:
febrero de 1997

Cualquier propuesta de carácter docente supone un ejercicio individual de profunda reflexión acerca de los fundamentos y contenidos de las materias afectadas, así como de las técnicas docentes aconsejables para su correcta transmisión. Este largo proceso de búsqueda, a través del estudio o lectura de artículos especializados y textos científicos y docentes, conlleva inevitablemente, por su propia naturaleza, el riesgo de reproducir carencias y limitaciones históricamente insertadas en los sistemas educativos modernos, en gran parte debidas a la inevitable masificación de la enseñanza en las sociedades desarrolladas, que imposibilita la estrecha relación personal profesor-alumno así como el contraste continuo de la eficacia o validez de las prácticas docentes en uso.

La inclusión de materias genéricamente agrupables bajo el título de Ingeniería Estructural en los planes de estudio de carreras técnicas de vocación constructora se remonta al siglo XVIII, cuando J.R. Perronet funda la "Ecole Nationale des Ponts et Chaussées", en París, en 1747.

No existía entonces ninguna estructura docente, tal y como hoy en día se entiende, en estas primeras escuelas. Los profesores procuraban transmitir a los reducidos grupos de alumnos sus conocimientos prácticos, adquiridos a través de su propia experiencia profesional, mostrando las técnicas seguidas para resolver los problemas constructivos asociados a un cierto tipo de estructura. Al mismo tiempo, se les formaba ya en disciplinas científicas tales como álgebra, cálculo diferencial e integral, mecánica, hidráulica, secciones cónicas, técnicas de corte de piedras, etc.

No resulta en ningún modo casual la creación de la primera Escuela de Caminos en la Francia del siglo XVIII, en plena Ilustración, en el Siglo de las Luces y de la Razón fruto de los ideales de la Revolución Francesa. La educación era concebida como instrumento de progreso social: "sólo el saber nos hará libres", más allá de su vertiente puramente formativa. Esta confianza ilimitada en el poder de la razón, en su dimensión social y revolucionaria, supuso un giro radical en el progreso de las ciencias, ya gestado en el siglo XVII, pero que durante la Ilustración se desarrolla dentro de un ambiente de profunda y fructífera interrelación con el campo de la técnica, en los albores de la época pre-industrial cuya culminación tendrá lugar en el siglo XIX.

Conviene detenerse algo más en la relación entre el conocimiento científico, "el porqué", y el técnico "el cómo", la "tecné" de Aristóteles, que en el Libro Alfa de su *Metafísica* ya establece cómo "la experiencia es un saber particular y por tanto difícilmente transferible, sólo pueden ser transmitidos los conocimientos que afectan a las primeras causas o principios de las cosas".

En la Edad Media, la adquisición de la "tecné", la capacidad para realizar las cosas, dentro de los gremios consistía en la enseñanza de la técnica de los artesanos, a través de la relación entre el "maestro de taller" y el "aprendiz", basa-

da en la convivencia entre ambos, como forma de aprendizaje.

En el Renacimiento se mantiene la estructura gremial, aunque se mejoran y desarrollan los métodos de adquisición y transmisión de los conocimientos, con prioridad de la observación frente a la autoridad religiosa como forma de acceso al saber. No obstante, sigue siendo la experiencia particular del "maestro" la que transmite a sus "discípulos" el "savoir-faire", la "tecné" aristotélica. Simultáneamente se producía ya una relajación de las relaciones de convivencia que acompañaban la transmisión del saber en la Edad Media.

El siglo XVII supone la gestación del método científico, hipotético-deductivo, punto de inicio del desarrollo de las Ciencias. Los trabajos de Galileo, Newton, Leibnitz, Pascal, Kepler y Mariotte, entre otros, cambiaron la imagen del mundo, en un primer intento de racionalizar la conducta práctica y la experiencia particular, de profundizar en el conocimiento de los principios teóricos, "el porqué", de la experiencia concreta.

Todavía este emergente desarrollo científico no se enmarcaba en el contexto social, situándose fuera de las Instituciones Académicas y Universidades, aún presas de la falta de libertad de pensamiento y todavía lejanas del proceso de secularización. Los gérmenes de la futura explosión científica de los siglos XVIII y XIX se ubican en las Sociedades Científicas que se fundan en Londres (Royal Society, 1660), París (Académie des Sciences, 1666), Berlin (Academia Berlinese, 1700), etc.

Es en la Ilustración, como hemos visto, que se produce el giro radical en el desarrollo de las relaciones entre Técnica y Ciencia, con la inclusión de las incipientes primeras disciplinas teóricas básicas, físico-matemáticas, junto con las enseñanzas empíricas y experimentales de las técnicas constructivas, bastante desarrolladas, en los programas de estudios de las primeras Escuelas Técnicas.

El espectacular desarrollo de las ciencias teóricas básicas durante el siglo XIX, como las Teorías de la Elasticidad, Plasticidad y Resistencia de Materiales, fue configurando la estructura del conocimiento de las llamadas "Ciencias de la Construcción" o, en terminología más actual, "Tecnologías de las Estructuras", que no constituyen sino el desarrollo de la "Mecánica de los Cuerpos Sólidos", rígidos o deformables, aplicada a la construcción.

El desarrollo y ampliación del conjunto de estos conocimientos condujo a una progresiva división de disciplinas cada vez más extensas, en la que lógicamente algunos conceptos engloban parcialmente a los demás, estructurando una división un tanto arbitraria según el tratadista o escuela de procedencia.

La configuración básica esbozada en los programas de estudios de las diferentes Escuelas de Ingeniería Civil que se fueron creando y desarrollando a comienzos del siglo XIX,

que puede seguirse a través de la consulta de las Memorias de los Cursos Académicos, ha seguido una continua evolución hasta nuestros días, en lógico y evidente paralelismo con el devenir histórico de los avances en los dominios teórico, experimental y de aplicación de técnicas constructivas de las disciplinas más directamente afectadas.

Los diferentes planes de estudios, estructurados según sucesivos proyectos y tendencias pedagógicas ensayadas en los países desarrollados, constituyen un continuo intento de adaptar y armonizar la cada vez más vasta y compleja extensión del campo de los conocimientos y aplicaciones tecnológicas a las limitaciones del proceso formativo de los estudiantes, dentro de un sistema educativo altamente masificado.

En líneas generales y sin profundizar en las cuestiones de matiz, muchas veces de índole terminológica, la formación del ingeniero especializado en estructuras se organiza en cuatro niveles:

▼ a) disciplinas teóricas básicas de carácter instrumental, físico-matemáticas, en las que se podría incluir la Mecánica clásica;

▼ b) disciplinas teóricas básicas ya sea de carácter estructural, como la Elasticidad, Viscoelasticidad y Plasticidad, incluidas según las tendencias actuales en lo que suele denominarse Mecánica de los Cuerpos Sólidos Deformables dentro del concepto más general de Mecánica de los Medios Continuos, ya sea relacionadas con el estudio de las propiedades de los Materiales de Construcción;

▼ c) disciplinas de Teoría de las Estructuras, que resultan de la aplicación de las anteriores al estudio de la estabilidad, dinámica, rotura y deformación de un sólido, Resistencia de Materiales, o de configuraciones más complejas de varios sólidos, Cálculo de Estructuras;

▼ d) disciplinas de aplicación tecnológica en el campo de la construcción, a su vez estructuradas ya sea por la tipología estructural: Puentes, Edificación Urbana, Edificación Industrial, ya sea por el material estructural: Hormigón Armado y Pretensado, Estructuras Metálicas, Estructuras Mixtas.

Nos centraremos en lo que sigue en la problemática de la enseñanza de las disciplinas de aplicación tecnológica en el

El espectacular desarrollo de las ciencias teóricas básicas durante el siglo XIX, fue configurando la estructura del conocimiento de "Ciencias de la Construcción" o "Tecnologías de las Estructuras", que no constituyen sino el desarrollo de la "Mecánica de los Cuerpos Sólidos", rígidos o deformables, aplicada a la construcción

campo de las estructuras, cuya docencia se plantea generalmente en los últimos cursos del 2º Ciclo de los diferentes planes de estudios de Ingeniería Civil. Este carácter fronterizo, al mismo tiempo colofón o remate del proceso formativo impartido y umbral o base de partida de la inminente práctica profesional, plantea la necesidad de una reflexión previa, de tipo pedagógico, sobre la formación del ingeniero en el ámbito de este tipo de disciplinas.

No resulta difícil constatar que el estado de opinión de los estudiantes de los últimos cursos coincide con el de los ingenieros recién incorporados al ejercicio profesional, en una visión crítica sobre el balance de la enseñanza recibida durante su estancia en la Universidad, centrada básicamente en una triple sensación:

▼ bajo rendimiento del ratio [formación adquirida/dedicación y capacidad intelectual invertida], con un coste personal que juzgan excesivo para el resultado obtenido;

▼ fuerte inseguridad en su capacitación técnica para hacer frente a las exigencias de la actividad profesional, que consideran como algo muy ajeno a las enseñanzas recibidas;

▼ pérdida apreciable de la motivación con que empezaron los estudios, lo que se traduce, en muchos alumnos, por un abandono de la tensión académica y del espíritu crítico y científico. Situación a la que conviene prestar la debida atención, por lo que supone de falta de aprovechamiento de los recursos y esfuerzos gastados en los cursos de formación básica, que sólo adquieren su verdadero sentido y justificación si se emplean para asentar y potenciar los conocimientos, conceptos y criterios estructurales básicos que permitan un alto nivel técnico y científico en la futura actividad profesional.

Hacer frente a esta triple carencia debe ser, en nuestra opinión, el principal reto de cualquier propuesta docente, lo que constituye una especie de exigencia previa o referente psico-pedagógico constante durante el desarrollo conceptual, metodológico y programático de la misma.

Desde nuestro punto de vista, la problemática antes descrita responde básicamente a una única cuestión fundamental: la dificultad de asentar y fijar en los alumnos una serie de criterios y conceptos básicos integradores del conjunto de conocimientos adquiridos, que permitan una correcta es-

tructuración de los mismos, potenciadora de su futura proyección en el ámbito profesional.

El desarrollo y masificación han conducido a la desaparición del modelo de relación “maestro taller-aprendiz” de la Edad Media y “maestro-discípulo” del Renacimiento, que incluso podríamos considerar en parte presente en las relaciones “profesor-grupos reducidos de alumnos” de los comienzos de las primeras Escuelas Técnicas, en los tiempos ilustrados de Perronet en Francia o de Agustín de Betancourt en nuestro país. Por otro lado, la creciente y acelerada extensión y complejidad del conjunto de conocimientos a impartir ha generado una progresiva subdivisión y especialización en compartimentos que, a pesar de su profunda interdependencia, aparecen frecuentemente extraños a los ojos del alumno.

Las disciplinas de aplicación tecnológica ocupan, por la propia naturaleza de la Ingeniería Civil, un papel fundamental, a modo de las dovelas de cierre o clave de un arco, en la solidez y estructuración definitiva que da sentido a cada uno de los elementos que configuran el edificio de la formación de los Ingenieros Constructores.

La enseñanza de estas materias debe por tanto plantearse en un intento de articulación dialéctica que permita estructurar la multiplicidad planteada. No se trata en cualquier caso de una dicotomía conceptual sino metodológica, que se articula gráficamente a partir de un sistema de ejes:

▼ el “eje horizontal”, que establece una “relación de simultaneidad” entre la Estructuras Metálicas y las distintas Tecnologías Estructurales: Hormigón Estructural (Armado o/y Pretensado) y Estructuras Mixtas o Híbridas, resultantes de la aplicación de diferentes tecnologías dentro de la misma estructura. Asimismo, es preciso establecer una estrecha y continua vinculación entre los métodos de análisis y control de una determinada tecnología estructural y las especiales problemáticas que se desvían de su aplicación a tipologías estructurales concretas: Puentes, Edificaciones Urbanas e Industriales, Cubiertas, etc., que suelen ser objeto de enseñanzas específicas. Se trata de corregir las lagunas o limitaciones a que conduce frecuentemente la parcelación académica, en la búsqueda de conceptos estructurales potentes e integradores;

▼ el “eje vertical”, que establece una “relación de sucesión” entre estas disciplinas de aplicación tecnológica, situadas en el final de los estudios de 2º ciclo, y el conjunto del proceso formativo del alumno, considerando el factor tiempo. Se trata de una relación dinámica vectorial con una doble vertiente:

● “retrospectiva”, que permita la puesta en juego activa de los conocimientos previos, impartidos con un cierto

grado de abstracción por las disciplinas teóricas básicas, al mismo tiempo que centre, fije y dé sentido a los conceptos teóricos fundamentales, mediante el oportuno contraste en su aplicación práctica a disciplinas tecnológicas concretas;

● “proyectiva”, orientada a establecer la necesaria ubicación entre la formación teórico-práctica proporcionada por la Universidad, y la práctica profesional inmediata, en un intento de clasificación y asentamiento de los conocimientos adquiridos, que, al mismo tiempo que asienta y asegura a los alumnos en su capacidad profesional, potenciando su creatividad, fomente un espíritu crítico y científico y un sentido ingenieril, que recurra siempre a los fundamentos teóricos aprendidos, evitando las nocivas desviaciones practicistas o los peligrosos excesos de confianza consustanciales con la ausencia de conceptos claros.

De las consideraciones que acabamos de exponer pueden extraerse algunas conclusiones concretas que, a modo de referente, resumen mi visión personal de los planteamientos que deben guiar la enseñanza actual en el ámbito de las disciplinas de tecnologías estructurales:

▼ a) Los contenidos a impartir deben plantearse con gran entidad y alcance, permitiendo la exposición de potentes esquemas integradores de los criterios parciales de análisis, control, dimensionamiento y ejecución de las técnicas afectadas. Su exposición debe hacerse desde perspectivas vinculadas al ejercicio práctico de la Ingeniería en su faceta estructural y dirigidas hacia las líneas de máximo interés para el proyecto y desarrollo de la actividad.

▼ b) La exposición y desarrollo de dichas materias debe plantearse incidiendo en aquéllos aspectos de mayor interés conceptual, enfrentándose a niveles de aplicación complejos y abiertos, que susciten la reflexión crítica sobre la consistencia, aplicabilidad y/o limitaciones de los conceptos básicos y criterios parciales estudiados en otras disciplinas, en un intento no solamente clarificador de los mismos, sino al mismo tiempo potenciador de su ámbito y posibilidades de aplicación a horizontes inicialmente no contemplados.

▼ c) Siguiendo la terminología planteada en los Eurocódigos, y presentando la lógica atención a la explicación de las Reglas de Aplicación concretas que se establecen en las normativas para el análisis, control y dimensionamiento de las estructuras, debe al mismo tiempo profundizarse en la formación del alumno según los Principios Generales del funcionamiento de dichas estructuras, basándose en modelos claros y consistentes que pongan

especial énfasis en la visualización conceptual de las respuesta estructural, con aplicación inmediata de principios mecánicos que incorporen la consideración de las condiciones de equilibrio y compatibilidad, así como de las leyes constitutivas de los materiales.

▼ d) Este tipo de modelos teóricos debe tender a planteamientos con suficiente generalidad que permitan la integración consistente y unificada de las Reglas de Aplicación de las diferentes tecnologías afines: Hormigón Estructural y Estructuras Metálicas, constituyendo las Estructuras Mixtas o Híbridas el punto de encuentro entre ambas. Todo ello en la línea de establecer principios y criterios básicos de seguridad, aplicables a cualquier tipo de estructura, con una visión de síntesis del comportamiento estructural, que permita destacar los mecanismos de interrelación de las respuestas combinadas de los elementos metálicos con otros tipos de materiales o sistemas, en una línea muy actual de sincretismo tecnológico, fundamental para el empleo lo más racional y positivo posible de todas las opciones de la construcción de nuestros días, superando así la actual compartimentación y aislamiento entre diferentes técnicas, perfectamente compatibles e integrables, todavía hoy día muy enraizada, no sólo a nivel docente, sino en la literatura técnica, las normativas y reglamentaciones y el conjunto de la industria, la administración y los profesionales de la construcción.

▼ e) Desde el punto de vista formativo, tal y como se ha expuesto anteriormente, resulta de gran interés este planteamiento unificado y consistente del problema estructural, que permita visualizar una transición gradual entre los criterios y conceptos básicos de seguridad de las estructuras metálicas, mixtas y de hormigón, sin discontinuidades conceptuales difíciles de justificar y enormemente perjudiciales para asentar y fijar conceptos sólidos en el alumno. Lo que no es en absoluto sinónimo de homogeneidad o uniformidad. Precisamente el aspecto singular de la formación en cada disciplina tecnológica ha de ser el establecer y delimitar con claridad la especificidad de cada técnica, impidiendo, por ejemplo la aplicación inmediata y apriorística de criterios de diseño universalmente aceptados dentro del campo de la construcción metálica o de hormigón, pero que no pueden ser generalizados automáticamente al ámbito de la construcción mixta, donde el trabajo conjunto de ambos materiales acentúa ciertos fenómenos y, en cambio, relativiza

Junto a ejercicios teórico-prácticos académicos o canónicos, que permitan ilustrar la aplicación más o menos directa de los conceptos y modelos teóricos expuestos en el programa, deben potenciarse los ejercicios prácticos de carácter más ingenieril

significativamente la importancia o magnitud de otros.

▼ f) Esta tendencia hacia modelos estructurales generales, amplios y consistentes, que por otra parte se ha detectado de forma nítida en los nuevos planteamientos del Código Modelo del 90 para estructuras de hormigón, genera un efecto potenciador y amplificador indudable, tanto a nivel formativo como en las normativas y recomendaciones, especialmente en el caso de las estructuras mixtas que, por su propia naturaleza tienden a potenciar las variantes tipológicas y los procesos innovadores dentro de la ingeniería, dejando rápidamente obsoletos aquellos principios o criterios establecidos con una visión limitada o

académica, de espaldas a tendencias que ya se vislumbran en la actualidad. Los modernos métodos de cálculo permiten hoy día superar la tendencia a formulaciones y planteamientos simplificados, de uso fácil pero limitado a casos particulares que pueden, en muchos casos, dar lugar a peligrosas o injustificables extrapolaciones, poco controladas, en su aplicación a multitud de problemas estructurales que se presentan inevitablemente en la práctica de la construcción y que difícilmente pueden ser contemplados de forma explícita en las reglamentaciones o, incluso, en la literatura especializada.

▼ g) Desde el punto de vista formativo, dichos modelos resultan mucho más atractivos, potenciando la capacidad de los alumnos para plantearse la resolución de problemas reales y reduciendo la desorientación y, consiguientemente, la sensación muy común de frustración, desmotivación e inseguridad, a la hora de aplicar o extrapolar las enseñanzas recibidas, o las reglas de aplicación incluidos en las normativas, a casos concretos, generalmente muy distintos de las soluciones canónicas o académicas explícitamente resueltas. Esta formación en los principios y conceptos fundamentales es, por otra parte, la única que permite el recurso, cada vez más necesario, a libros o normativas extranjeras, haciendo posible el contraste y discusión de los criterios y fórmulas de cálculo y dimensionamiento allí expuestos, mediante la adecuada interpretación de sus limitaciones y fundamentos teóricos, evitando así peligrosas extrapolaciones no controladas.

▼ h) La formación estructural según esquemas potentes e integradores pone inmediatamente de relieve las enormes ventajas y posibilidades que ofrecen los sistemas

mixtos o híbridos, que combinan muy diversos campos relacionados de una u otra forma con las estructuras metálicas y, a la vez, con otros materiales para su utilización conjunta tratando de aprovechar al máximo las posibilidades estructurales, constructivas y formales de cada uno de los sistemas integrantes. Su conocimiento profundo permite al ingeniero desarrollar soluciones estructural y constructivamente adaptadas a la resolución de cualquier tipo de problema pero, al mismo tiempo, perfectamente aplicables a la optimización de sistemas sencillos que deben repetirse un gran número de veces, a la industrialización de tecnologías, a la resolución de gran número de detalles constructivos, al desarrollo de técnicas y procesos de ejecución y montaje, al refuerzo o rehabilitación de estructuras existentes, etc. La transmisión, aunque sea de modo parcial, a los alumnos de las posibilidades y potencialidad de esta concepción estructural integrada, resulta a nuestro entender de un altísimo valor formativo.

▼ i) Junto a ejercicios teórico-prácticos académicos o canónicos, que permitan ilustrar la aplicación más o menos directa de los conceptos y modelos teóricos expuestos en el programa, deben potenciarse los ejercicios prácticos de carácter más ingenieril, que aproximen progresivamente al alumno a la realidad de la práctica profesional, exigiéndole la puesta en juego de los recursos teóricos apropiados para la resolución del problema planteado, obligándole a adoptar hipótesis simplificadoras razonables que permitan abordar cada caso de forma sencilla pero suficientemente aproximada, y fomentándole la reflexión crítica sobre las hipótesis de partida de los modelos teóricos utilizados con objeto de contrastar la validez de su aplicación. Los problemas clásicos, que resultan muy adecuados como complemento de la formación teórica en las disciplinas básicas, instrumentales o estructurales, enfrentan al alumno a un enunciado impuesto y, en general, completamente definido, orientado a buscar la solución o respuesta correcta dentro de los términos en los que se ha planteado. En su actividad profesional, el ingeniero que se enfrenta a un problema estructural debe comenzar por plantear el modelo de análisis adecuado para resolverlo, es decir, por plantearse asimismo el enunciado del problema.

Dicho modelo debe ser elegido con idea de obtener la información "mínima necesaria" más bien que la "máxima posible" para proceder al diseño y dimensionamiento de la estructura, dentro de unos límites económicos y razonables de seguridad. Para lo cual debe proceder a una serie de "idealizaciones" o "modelizaciones" de la realidad, con un sentido ingenieril, tanto en lo que se refiere al esquema estructural, como a la magnitud de las acciones, a su ubicación y combinación buscando las hipóte-

sis pésimas de cálculo, al tipo y nivel de precisión del análisis a realizar y a la interpretación de los resultados con vistas al dimensionamiento. Cada una de estas etapas exige la puesta en juego por parte del alumno/ingeniero del conjunto de sus conocimientos teóricos. La adopción de criterios incorrectos dará lugar a diseños inaceptables desde el punto de vista económico o, lo que puede ser más grave, al riesgo de serias desviaciones del coeficiente de seguridad por debajo de los límites admisibles. El auxilio y la orientación del profesor, mediante la elección de ejercicios adecuados, guiará al futuro ingeniero en estos primeros pasos de su "ejercicio profesional", ayudándole a detectar sus posibles carencias o errores conceptuales y fomentándole su motivación, al ver plasmada la utilidad práctica de sus conocimientos, al mismo tiempo que asienta su seguridad en la formación adquirida.

▼ j) Se fomentará la formación y familiarización del alumno en los conceptos semiprobabilísticos de seguridad según el Método de los Estados Límites. La propia naturaleza del proceso de aprendizaje tiende a asociar, de manera casi inconsciente, la seguridad de una estructura al resultado de su control mediante un método de cálculo, generalmente complejo y laborioso a pesar de los avances del cálculo automático en las últimas décadas. Ya se ha comentado en el apartado anterior la necesidad de poner énfasis en la interpretación con criterio ingenieril del proceso de idealización o modelización de la respuesta estructural de cada problema analizado, fuente generalmente de errores de más difícil detección y mayor trascendencia que los derivados de los métodos de cálculo y dimensionamiento. Citando como ejemplo a dos famosos ingenieros franceses:

J.R. Robinson: "Constituye un abuso del lenguaje decir que se calcula un puente; nunca un puente ha salido de un sistema de ecuaciones ... Solamente se calcula aquello que previamente se ha proyectado".

Freyssinet: "No existen para mí más que dos fuentes de información: la percepción directa de los hechos y la intuición, en la que yo veo la expresión y el resumen de todas las experiencias acumuladas por la vida en el subconsciente de los seres. Es preciso, bien entendido, que la intuición sea controlada por la experiencia. Pero cuando ella se encuentra en contradicción con el resultado de un cálculo, yo hago repetir el cálculo. Nunca encontramos al final de un cálculo nada que no hayamos colocado previamente en el origen".

Parece innecesario señalar que las citas anteriores no tienen por objeto más que situar el cálculo en su lugar dentro del proyecto de una estructura, sin menoscabo de su innegable importancia. Sólo un profundo conocimiento del mismo permite tales afirmaciones, ya que su des-

conocimiento constituye una traba insuperable que impide abordar diseños correctos.

Sin profundizar más en la dialéctica [proyecto/cálculo], sí quisiéramos insistir en la dualidad [resultado del cálculo/seguridad]. Resulta imprescindible destacar la importancia de fomentar en el alumno una posición crítica frente al concepto ingenieril de la seguridad a partir del estudio de la "sensibilidad" del resultado de un cálculo frente a posibles variaciones, dentro de un rango ingenierilmente admisible, de los valores de los parámetros más influyentes. Ello exige seleccionar correctamente dichos parámetros, establecer probabilísticamente los rangos de variación y, finalmente, interpretar ingenierilmente las oscilaciones obtenidas en los resultados del cálculo con objeto de extraer las debidas conclusiones sobre el nivel de seguridad real de la estructura. Una formación del alumno orientada en estos conceptos debe permitir, al mismo tiempo, imbuirle una imprescindible visión crítica sobre las limitaciones y pretendida exactitud de los métodos de cálculo y, lejos de dejarle inerte frente a ellos, introducirle en los principales mecanismos de reserva resistente, generalmente no lineales, cuya adecuada comprensión es la única, pero muy potente, garantía de seguridad de las estructuras, que construimos, y base de su espectacular desarrollo.

▼ k) El concepto de "sensibilidad" no está suficientemente presente, a nuestro entender, en el discurso técnico, no sólo a nivel docente, sino también en la literatura técnica y en la práctica profesional, constituyendo una herramienta indispensable para valorar la seguridad real de las estructuras frente a estados límites de servicio (fisuración, niveles de pretensado, efectos diferidos, redistribuciones tensionales elásticas, etc.) y agotamiento (inestabilidad de paneles y elementos lineales, redistribuciones elastoplásticas, interacciones de esfuerzos M-N-V, ductibilidad de secciones y estructura, influencia de las presolicitaciones elásticas de montaje o por deformaciones impuestas, efecto de las tensiones residuales e imperfecciones geométricas, etc.), fenómenos todos ellos imposibles de caracterizar mediante relaciones lineales biunívocas del tipo causa-efecto. Por otra parte, un planteamiento de este tipo permite profundizar en el conocimiento mecánico de estos fenómenos, evitando interpretaciones o extrapolaciones erróneas de muchos criterios convencionalmente admitidos.

En el caso de las Tecnologías Estructurales, deberá concienciarse al alumno sobre la importancia esencial de una correcta concepción de los detalles constructivos, que sea coherente con los modelos de análisis utilizados para el cálculo

▼ l) En una disciplina de aplicación tecnológica orientada a la construcción, debe enfrentarse continuamente al alumno al referente constructivo. El espectacular desarrollo de las técnicas de prefabricación, transporte, elevación y montaje de grandes unidades ha transformado radicalmente el panorama de la construcción en los países desarrollados, orientándolo hacia una progresiva industrialización y versatilidad de los procesos de ejecución, muchas veces condicionantes del diseño mismo de las estructuras. El caso de los puentes, quizás el más llamativo, puede considerarse paradigmático, estructurándose en muchos casos la docencia y la literatura técnica a partir del tipo de proceso constructivo (voladizos sucesivos, empuje, avance tramo a tramo, dovelas prefabricadas, etc.) en vez de la tipología estructural o la morfología de la sección transversal. Lo mismo podría afirmarse de la construcción de grandes cubiertas, y edificios de altura o con elevado número de sótanos.

Esta tendencia se caracteriza por el recurso a procesos constructivos altamente evolutivos en los que la configuración estática definitiva se alcanza a través de una compleja secuencia de fases con esquemas resistentes variables, no sólo a nivel de estructura sino asimismo a nivel de sección, como suele ocurrir en el caso de estructuras mixtas hormigón-acero o de estructuras híbridas de zonas o elementos de hormigón prefabricado y de hormigón in situ. El alumno debe por tanto familiarizarse con esta problemática que supone no pocos cambios cualitativos en los esquemas docentes clásicos más adaptados a una visión estática y acotada de la problemática estructural.

La inagotable versatilidad de técnicas y procesos constructivos, su carácter evolutivo y el uso cambiado de tecnologías y materiales diferentes dentro de una misma estructura exige el progresivo abandono de muchos de los modelos teóricos clásicos, pensados para resolver problemas concretos y acotados, pero poco versátiles para su adaptación y aplicación a esta nueva situación. Los programas docentes deben por tanto tender a su progresiva sustitución por otros modelos más integradores y potentes, con mayor contenido conceptual y capaz de generalización a las imprevisibles innovaciones de los procesos constructivos. Esta exigencia debe extenderse paralelamente a los métodos de análisis, que deben orientarse hacia algoritmos de mayor generalidad que, por un proceso de reducción, engloban los procedimien-

tos simplificados válidos para estructuras standard. Asimismo es precisa una profunda reflexión sobre el actual tratamiento de los controles y criterios de estados límites para paliar las serias incertidumbres y carencias que se detectan cuando se intentan aplicar a este tipo de estructuras altamente evolutivas.

Los ejercicios prácticos que se planteen a los alumnos deben incorporar esta problemática, obligándoles a modelizar adecuadamente, como parte del ejercicio, los esquemas estructurales adecuados para el control o dimensionamiento de estructuras en las que se planteen diferentes secuencias de montaje.

▼ m) Finalmente, en el caso de las Tecnologías Estructurales, deberá concienciarse al alumno sobre la importancia esencial de una correcta concepción de los detalles constructivos, que sea coherente con los modelos de análisis utilizados para el cálculo, así como en la necesidad de controlar y respetar las tolerancias geométricas y los procesos de ejecución de las uniones, soldadas principalmente, según los criterios establecidos en las normativas y recomendaciones, como condición inexcusable para la validez de los métodos de análisis y control de dichas estructuras.

El Conjunto de reflexiones expuestas adquiere una especial relevancia en nuestros días, ya que el espectacular crecimiento y desarrollo de los programas de cálculo electrónico aplicables al cálculo de cualquier tipo de estructura ha modificado substancialmente el papel del ingeniero estructuralista. La resolución numérica del problema resistente ha dejado de ser un problema, por muy compleja o heterodoxa que pudiera ser la estructura a analizar. Resulta por tanto necesario plantearse cuál es el nuevo papel del ingeniero en el proceso del proyecto y construcción de estructuras, lo que permitirá orientarnos en la metodología y contenidos del proyecto docente a proponer. Desde nuestro punto de vista, el ingeniero estructuralista hoy día debe formarse sólidamente para no sólo extraer el máximo aprovechamiento de la potencialidad de los métodos de cálculo disponibles, sino, lo que resulta esencial, garantizar la validez de los resultados obtenidos. Ello nos lleva al final, tras esta larga disgresión, a lo que sigue siendo la esencia de la actividad del ingeniero: modelizar correctamente las estructuras reales que proyectamos y construimos, interpretar correctamente los resultados del análisis de dichos modelos y, finalmente, dimensionar y diseñar adecuadamente los elementos resistentes y los detalles para que respondan a la estructura así analizada. ●