

Impacto de nuevas tecnologías en la ingeniería estructural

The Impact of new Technologies in Structural Engineering

José Manuel Roësset Vinuesa. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Regents Profesor Texas A&M University. jroesset@tamu.edu

Resumen: El rápido desarrollo de los ordenadores digitales, como herramientas de cálculo, como procesadores de cantidades ingentes de datos y como medio eficaz de comunicaciones ha sido uno de los mayores factores en la evolución de la ingeniería estructural en la segunda mitad del siglo XX, y promete seguir siéndolo en este siglo. Aunque su impacto se ha notado ya, tanto en la práctica como en la enseñanza, queda todavía mucho por hacer, tanto en el proyecto y cálculo de estructuras como en su proceso constructivo. Hay por otra parte una serie de desarrollos en el campo de la instrumentación, en las técnicas de mediciones y tomas de datos, y en el dominio de los materiales, que están teniendo ya y van a tener aun más en el futuro un impacto importante en el campo de las estructuras. En este artículo se repasan algunos de los impactos que estas nuevas tecnologías han tenido ya y se intenta prever algunos de los efectos que pueden esperarse en el futuro como continuación y extrapolación de lo ya ocurrido.

Palabras Clave: Cálculo electrónico, Construcción Virtual, Control, Estructuras, Materiales inteligentes, Proceso y Transmisión de datos

Abstract: The rapid development of digital computers as calculation tools, processors of vast quantities of data and as an efficient means of communication has served as one of the main factors in the development of structural engineering over the latter half of the 20th century and will undoubtedly continue to be so throughout this century. While the impact has already been noted at both a practical and teaching level, there is still much to do both with regards to design and calculation of structures as well as in the construction process. This has been accompanied by a series of developments in the field of instrumentation, in measurement techniques, data recording and in the control of materials and this is having, and will increasingly continue to have, an important impact in the field of structures. This article describes some of the impacts that these new technologies have had and attempts to forecast

Keywords: Electronic calculation, Virtual Construction, Control, Structures, Intelligent Materials, Data Processing and Transmission

Introducción

Uno de los mayores factores influenciando la evolución de la ingeniería estructural en la segunda mitad del siglo XX ha sido el desarrollo de los ordenadores digitales como herramientas ingenieriles. Los ordenadores pueden usarse para llevar a cabo cálculos complejos y laboriosos con gran rapidez y precisión, como instrumentos para el almacenamiento y proceso de cantidades ingentes de datos presentados en distinta forma (palabras, gráficos, números), y como medios de comunicación a nivel mundial. Estos tres modos de operación han jugado ya un papel importante en la forma en que se proyectan y construyen estructuras, u obras civiles en general, pero su impacto puede ser todavía mucho

mayor en este siglo. Como herramienta de cálculo, el ordenador ha liberado al proyectista de la penosa labor de llevar a cabo cálculos rutinarios, permitiéndole dedicarse a las fases más creativas e importantes del proyecto, investigar un mayor número de alternativas, predecir mejor el comportamiento de la obra durante su vida así como su costo total, incorporar en el proyecto la planificación del proceso constructivo a utilizar, e integrar el cálculo de las distintas componentes del sistema en vez de considerarlas por separado. La capacidad de almacenar y procesar grandes cantidades de datos ha permitido considerar un mayor número de variables y las interacciones entre las mismas, usar como consecuencia modelos más completos y realistas de la estructura, y mantener archivos completos de la obra

y su evolución, tanto durante el proceso constructivo (de gran importancia para su mantenimiento) como una vez en servicio. Al mismo tiempo permite archivar y mantener no solo datos numéricos sino también planos, fotografías, películas e incluso vistas tridimensionales. Las facilidades actuales de comunicaciones a escala mundial a través del Internet, permiten, por otra parte, el desarrollo del trabajo por equipos que están separados geográficamente, dando lugar a la ingeniería concurrente, con importantes implicaciones económicas y sociales.

En este artículo se explora el impacto del ordenador en cada uno de estos tres aspectos en la evolución de la ingeniería estructural durante los últimos 50 años, se discuten posibles mejoras y las necesidades de investigación y desarrollo necesarias para que estas sean factibles, y se intenta vislumbrar posibles tendencias futuras. No se pueden olvidar, sin embargo, otras tecnologías que también han jugado, están empezando a jugar, o pueden jugar en el futuro un papel importante en la ingeniería estructural. Tales son los nuevos desarrollos en materiales y en instrumentación para auscultación y mantenimiento de obras. No es ya cuestión únicamente de tratar de predecir el comportamiento de un sistema bajo la acción de las solicitaciones a las que puede verse sometido durante su vida (el objetivo tradicional del cálculo de estructuras), sino que se va a poder en el futuro proyectar estructuras para que se comporten del modo deseado. Aunque aun queda mucho por hacer se puede vislumbrar ya la posibilidad de proyectar estructuras inteligentes que controlan su propio comportamiento y se 'automantienen'.

Impacto del Ordenador como herramienta de cálculo

Los grandes desarrollos en el cálculo de estructuras se iniciaron en el siglo XVII, continuaron en el XVIII, y tuvieron un gran auge en el siglo XIX y la primera mitad del XX. Como consecuencia se perciben a menudo la ingeniería estructural, y la ingeniería civil en general, como profesiones ya establecidas con poca innovación reciente. Sin embargo el progreso y las innovaciones fueron considerables en la segunda mitad del siglo pasado y continúan hoy en día. Fue Charles L. Miller, Director del departamento de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Massachusetts, el primero en postular que el ordenador no era tan solo una herramienta de investigación científica para departamentos de Matemáticas o de Ingeniería Eléctrica de universidades, sino también una herramienta básica en la práctica de la ingeniería. Miller indicó claramente que para alcanzar el potencial práctico del ordenador era necesario facilitar la comunicación entre ser humano y máquina, haciendo la entrada y salida de datos más fáci-

les de entender y asequibles a personas no expertas en el tema.

Los primeros usos del ordenador se limitaron a la codificación en programas de las mismas técnicas usadas para el cálculo a mano: la ecuación de los tres momentos, los métodos de Cross y Kani para el cálculo de marcos tomando en cuenta solo la deformación a flexión, soluciones semi-analíticas con desarrollos en serie, soluciones con diferencias finitas para problemas continuos con geometrías rectangulares y mallas con espaciamientos constantes, etc. Se conseguía así mayor rapidez de cálculo pero no necesariamente mayor precisión (excepto por aquella conseguida al aumentar el número de variables.) La disponibilidad de mejores herramientas de cálculo, con mayor rapidez y capacidad de memoria, dió lugar, sin embargo, a la generación de nuevas formulaciones y métodos, que, a su vez, requirieron aumento de rapidez y capacidad. Se desarrollaron así nuevos procedimientos, más apropiados para el ordenador, que proporcionaban predicciones más exactas, y que permitían encontrar soluciones para problemas que anteriormente no se podían abordar. La formulación matricial de estructuras de barras, el método de elementos finitos, usado hoy en día en todos los campos, pero originado por ingenieros estructurales, el método de los elementos de contorno, o procesos de cálculo en Mecánica de Fluidos para resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes y reproducir mejor las acciones de un fluido sobre una estructura, son algunos ejemplos notables. El desarrollo del ordenador y como resultado de estas nuevas metodologías han dado lugar de hecho a la creación de una nueva disciplina, la Mecánica Computacional, y a un cambio de énfasis, del cálculo diferencial al cálculo numérico y la Matemática Aplicada.

El cálculo matricial permitió no solo resolver con mayor rapidez estructuras más grandes, sino también mejorar la precisión incorporando los efectos de la deformación axial de las columnas (que es importante para marcos esbeltos sometidos a cargas laterales) y la deformación por corte de vigas o columnas de gran canto (ICES-STRUDL, 1968). El método de los elementos finitos ha permitido entre otros: la solución de problemas de Elasticidad plana o tridimensional (concentración de tensiones, por ejemplo) con geometrías arbitrarias; el cálculo de placas y losas con cualquier geometría y condiciones de borde; el cálculo de todo tipo de estructuras laminares, incorporando no solo los efectos de membrana y la flexión cerca de los bordes sino la solución completa, para condiciones de carga y de apoyos arbitrarias, tomando en cuenta la interacción con otros elementos estructurales; cálculos no lineales incorporando tanto los efectos de grandes deformaciones y el cambio en la geometría (problemas de estabilidad o pandeo), como el comportamiento inelástico de los materiales. El método de los elementos de contorno permite resolver muchos de los mismos

problemas que el de elementos finitos y proporciona además soluciones más económicas para problemas de propagación de ondas en medios infinitos o semi-infinitos, y el estudio de la interacción entre distintos medios (estructura y suelo subyacente, estructura y agua circundante, etc.) Incluso métodos ya existentes, como el de diferencias finitas, han sido el objeto de nuevos desarrollos extendiendo su aplicación a dominios con geometría y condiciones de contorno arbitrarias y usando mallas con espaciamientos variables. Mucho progreso se ha logrado igualmente en el cálculo dinámico de estructuras sometidas a todo tipo de cargas, y especialmente a solicitaciones sísmicas, y en la modelación del comportamiento real de los materiales (métodos de cálculo no lineal en el dominio del tiempo y en frecuencias). Las nuevas posibilidades de cálculo en el dominio de la frecuencia, combinadas con el desarrollo de nuevas técnicas de toma de datos y nueva instrumentación han permitido por otra parte el desarrollo de nuevos medios de auscultación de obras (estructuras, pavimentos, depósitos de suelo) para determinar sus propiedades 'in situ', su integridad o posible deterioro, o la existencia de defectos constructivos.

Queda aun mucho por hacer en el campo de la modelación del comportamiento inelástico de los materiales, incluyendo tanto los materiales naturales (suelos, roca), los materiales convencionales (hormigón y acero), y nuevos materiales que se están desarrollando. Se precisa un mejor conocimiento de los efectos de tiempo, condiciones ambientales, velocidad de carga, estados tensionales, y en muchos casos su evolución histórica, para poder predecir con mayor precisión su comportamiento. Lo que en el pasado hubiera parecido irrealizable en cuanto a modelación matemática, es hoy posible gracias al ordenador. Sin embargo las capacidades de cálculo y de la modelación matemática superan hoy nuestro conocimiento del comportamiento físico, que requiere un mayor esfuerzo experimental. El desarrollo y creciente uso del ordenador no ha eliminado la necesidad de estudios experimentales sino que la ha incrementado.

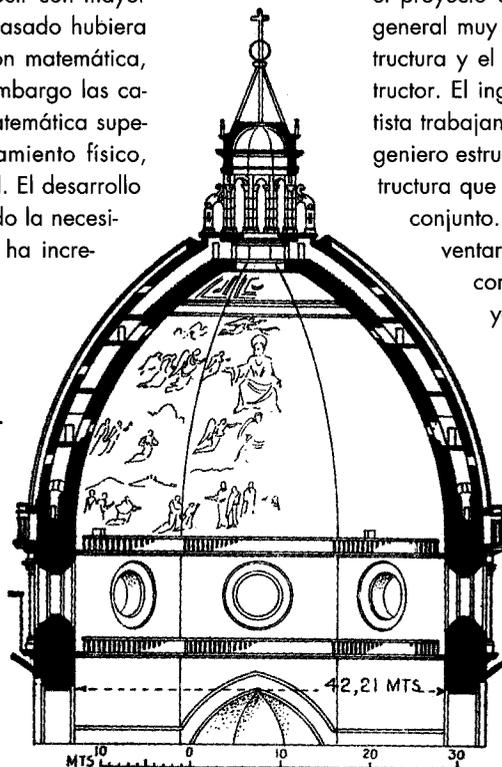
Impacto del Ordenador como procesador de datos

Al mismo tiempo que la rapidez de cálculo del ordenador y su capacidad de memoria daban lugar al desarrollo de modelos con mayor número de grados de libertad y a nuevos métodos de cálculo más precisos, permitían también investigar más alternativas en busca de una solución óptima, considerar un mayor número de hipótesis o combinaciones de cargas, y tomar en cuenta incertidumbres debidas a las po-

sibles e inevitables variaciones en las dimensiones de los elementos, en las propiedades de los materiales y en los valores de las cargas, mediante estudios estadísticos o probabilísticos. La gran capacidad de memoria hubiera debido permitir también integrar las distintas fases del proyecto y la construcción (Reinschmidt, 1991), considerando la obra total como un sistema único, en lugar de estudiar por separado los distintos subsistemas, ignorando sus interacciones. Esto facilitaría la comunicación entre los distintos participantes en el proyecto. Sin embargo el sueño de Charles Miller cuando inició el desarrollo del sistema ICES (Integrated Civil Engineering System) sigue sin realizarse y es este un área en la que queda mucho por hacer.

El proyecto de una estructura requiere satisfacer una serie de requisitos funcionales, estéticos, y económicos (Torroja, 1957). Es preciso además comprobar que la estructura y su cimentación tienen la capacidad suficiente para resistir sin daño, o sin peligro para las vidas de sus ocupantes, en el caso de cargas extremas, las cargas a las que se verán sometidas durante su vida. Y es igualmente necesario que la estructura puede construirse de forma sencilla y económica; variaciones en su topología o en sus detalles pueden afectar grandemente la facilidad (o dificultad) del proceso constructivo, con importantes consecuencias en cuanto al costo. Es normal hoy en día, en muchos países, que el estudiante de ingeniería civil especializándose en estructuras no tome ningún curso de Geotecnia (o que tome solo uno, estudiando las propiedades básicas de suelos, pero sin abarcar el proyecto de cimentaciones) ni de construcción. Hay en general muy poca interacción entre el proyectista de la estructura y el de la cimentación, y entre proyectista y constructor. El ingeniero a cargo de la cimentación y el contratista trabajan en base a los datos proporcionados por el ingeniero estructural, sin poder sugerir modificaciones a la estructura que podrían resultar en una mejor solución para el conjunto. No es de extrañar que haya sido necesario inventar un nuevo término, 'constructibilidad', para recordar a los ingenieros estructurales que un proyecto no es nada a menos que se construya y se convierta en realidad, y que el coste de la construcción puede superar por mucho al de los materiales. No basta por ello planear el proceso constructivo cuando se ha completado el proyecto. Sería mucho más lógico y eficaz considerar como se va a construir la estructura durante el proyecto mismo, con una participación más activa del constructor. Esto requeriría la integración de las distintas componentes del proyecto y la posibilidad de disponer de una base de datos comunes donde se almacenara toda la información sobre la obra, el uso de programas de cálculo y dimensionado compatibles con

Cúpula de la Catedral de Florencia. (Brunelleschi, 1420-1427).



esta base de datos, y el almacenamiento de la información de forma visual además de numérica. Es esto algo que ya es factible y se han creado ya en España bases de datos con estas características. Lo que es preciso es hacer uso de esta herramienta durante la fase de proyecto y esto puede requerir modificar la forma de trabajo de algunas oficinas de ingeniería con mayor énfasis en la labor de equipos.

La gran capacidad de memoria de los ordenadores actuales permite mantener una base de datos completa durante la ejecución del proyecto así como durante la construcción y, una vez terminada esta, durante la vida de la estructura. Esto es de primordial importancia durante estas etapas iniciales en la vida de la obra así como para su mantenimiento, para estimar el grado de seguridad existente si la estructura se ve dañada por cargas extremas, y para posibles reparaciones futuras. En la primera mitad del siglo XV Filippo Brunelleschi ganó el concurso para la construcción de la cúpula de la iglesia de Santa Maria de Fiore en Florencia. Para ello construyó un modelo de ladrillo, a escala 1:24, con unos 4 m. de altura y 2 m. de luz. El modelo, situado en la Piazza del Duomo permitía a los miembros de la Opera del Duomo, representantes del propietario, y al público en general, pasear por dentro y observar el proceso constructivo, sin andamiaje. Modelos estructurales de ladrillo, madera, arcilla, cera y escayola, a menor escala que el de Brunelleschi, se habían usado durante la Edad Media para ilustrar el comportamiento y el proceso constructivo de las catedrales góticas. Arquitectos usan todavía modelos de madera y plástico para visualizar la obra y enseñársela al propietario. Desgraciadamente el uso de modelos se ha perdido en la ingeniería. Hoy en día, sin embargo, se pueden desarrollar fácilmente modelos virtuales en el ordenador que pueden girarse y colocarse en distintas posiciones, permitiendo visualizar la obra en tres dimensiones. Modelos virtuales han sido usados extensamente en Japón para el trazado de tuberías dentro de plantas nucleares, indicando la posición de válvulas y el camino más rápido para acceder a ellas. Se han usado también en el proyecto e instalación de plataformas marinas en aguas profundas. En ambos casos los modelos permitían el llamado «walk through» o tránsito por dentro de la obra. Sin embargo la ruta a seguir estaba siempre prefijada sin posibilidad de cambios. El usuario del programa no era libre de escoger una ruta o una vista distintas de las programadas. El paso siguiente es el desarrollo de modelos virtuales de una obra en cuatro dimensiones, la cuarta dimensión siendo el tiempo: modelos que permitan ver como evolucionaría la construcción de acuerdo con el plan previsto durante la fase de proyecto, como se esta desarrollando en la realidad, cual es el estado en un instante determinado (incluyendo cantidades de materiales y mano de obra y gastos incurridos.) Estos modelos deberían permitir no solo el seguimiento de la marcha de la obra sino también predecir los efectos de posibles

cambios en el plan original como respuesta a lo acontecido. El uso de estos modelos durante la fase del proyecto, para explorar alternativas en el tipo de estructura y en su proceso constructivo, durante la ejecución como control del proceso, y durante su vida para facilitar el mantenimiento, puede tener un impacto en la práctica mucho mayor que el desarrollo de los nuevos métodos de cálculo.

Impacto del Ordenador como medio de comunicaciones

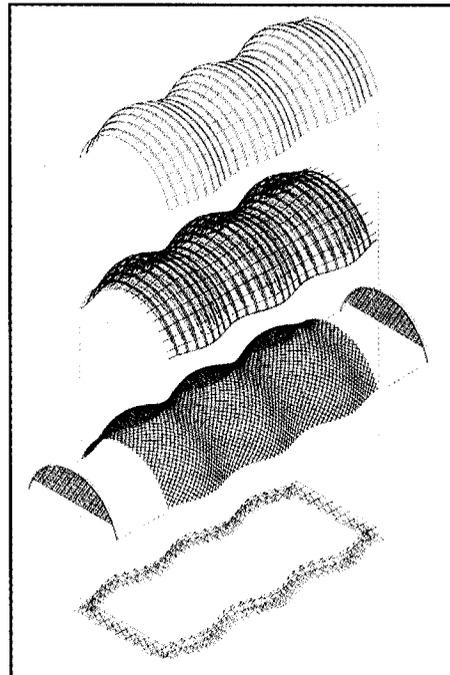
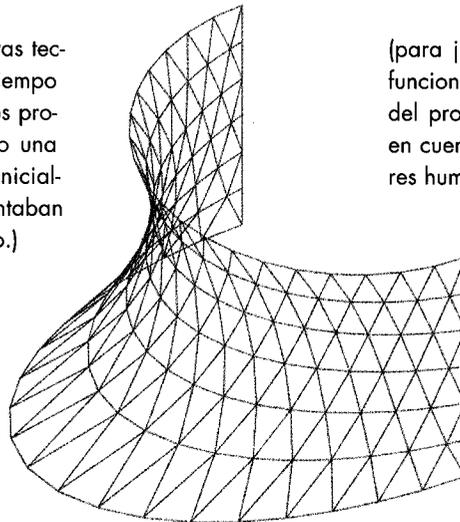
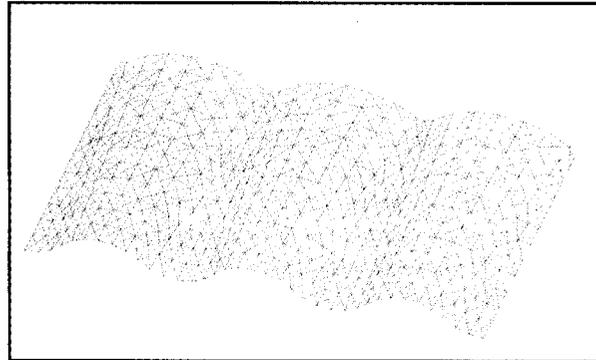
Mientras que el ordenador como herramienta de cálculo sigue estando rodeado de un aura de misterio para muchos ingenieros, su uso como medio de comunicaciones es hoy en día universal no solo por personas con conocimientos técnicos sino por el público en general, en todos los países del mundo. Como se indicó en la sección anterior el proyecto de una obra civil requiere la participación de una serie de actores. Hay todavía en muchos casos poca comunicación entre el arquitecto, el ingeniero estructural que lleva a cabo el proyecto de la estructura, el ingeniero geotécnico que proyecta y calcula la cimentación, los ingenieros que proyectan los equipos mecánico y eléctrico en el caso de un edificio (ascensores, conductos de ventilación, calefacción y aire acondicionado, cables eléctricos, cañerías, etc.), y el ingeniero a cargo de la construcción. Con la creciente especialización estos actores tienen a veces muy poco conocimiento de temas ajenos a su especialidad, usan distintas terminologías, y prefieren trabajar por separado. La falta de comunicación e integración de sus esfuerzos da lugar a soluciones que no son las mejores, a un aumento en el coste, a retrasos en el proyecto y en la construcción, y en algunas instancias a errores con consecuencias catastróficas. Este es el caso cuando un cambio, aparentemente pequeño para el que lo efectuó, pasa desapercibido pero afecta la estabilidad de la obra.

La internacionalización de las grandes obras de ingeniería en la nueva economía global ha resultado en proyectos que pueden ser desarrollados por varios actores trabajando simultáneamente en varios países e incluso en distintos continentes. La existencia de programas de cálculo reconocidos y aceptados internacionalmente ha facilitado este proceso permitiendo el uso de mano de obra más económica con personas expertas en el uso de estos programas, que pueden incluso no ser ingenieros, siempre que estén bajo la supervisión de uno. El factor decisivo ha sido sin embargo la facilidad de comunicación electrónica rápida y confiable. Tanto los datos de entrada como los resultados de los cálculos pueden transmitirse inmediatamente por correo electrónico, pero la transmisión de grandes archivos, como los necesarios para almacenar imágenes tridimensionales, es más delicada. Ha habido incluso casos en que,

para reducir la duración del proceso, que afectaba significativamente el coste de la obra, se ha iniciado la fabricación de algunos elementos en otros países antes de haberse completado el proyecto (algunas plataformas marinas para la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas.) En estos casos la importancia de adecuadas comunicaciones entre los distintos participantes se hace todavía más importante. El uso del ordenador en la ingeniería concurrente se encuentra en estado embrional. Las nuevas tecnologías se usan con éxito para reducir el tiempo de ejecución y reducir costos con los mismos procedimientos con los que se llevaría a cabo una operación normal (del mismo modo que inicialmente se usaban programas que implementaban los métodos tradicionales de cálculo a mano.)

No se aprovechan debidamente las posibles ventajas del ordenador a menos que se desarrollen nuevos procesos y modos de operación especialmente concebidos para explotar mejor la capacidad de las máquinas (equivalentes por ejemplo a los elementos finitos en el área del cálculo.) El progreso en este campo, y en la industria de la construcción en general, ha sido pequeño y muy lento. No es que no se usen ordenadores en la industria de la construcción. Se usan extensamente. Pero se usan todavía de modo primitivo, faltando el desarrollo de nuevos métodos de planificación y control que aprovechen mejor su potencial. Los métodos que se usan son en muchos casos los que se desarrollaron hace 50 años, con poca flexibilidad para tomar en cuenta el riesgo asociado con distintas soluciones, o poder reaccionar de forma eficiente a los acontecimientos, adoptando nuevas medidas o introduciendo cambios cuando estos son necesarios. El desarrollo de los modelos virtuales en cuatro dimensiones a los que se aludió antes puede jugar un papel decisivo en este área.

Dada la importancia de las comunicaciones la ingeniería concurrente precisa de la base de datos común a la que se aludía anteriormente, de un proceso jerárquico que establezca quien puede introducir modificaciones en un momento determinado y a que personas hay que notificar que un cambio ha ocurrido,



Mallas de Elementos Finitos para cálculo de estructuras.

y de un control de las reacciones a estos cambios (que podrían dar lugar de otro modo a muchas otras modificaciones y una reacción en cadena). Se necesitan dispositivos para que cada actor pueda extraer de una base de datos gigantesca la información pertinente para su trabajo de forma fácil, rápida y segura. Algunos actores necesitan solo datos numéricos. Otros requieren datos gráficos en forma de planos bidimensionales o en forma de imágenes tridimensionales

(para juzgar la calidad estética, para visualizar aspectos funcionales como la circulación, o para seguir la evolución del proceso constructivo.) Al mismo tiempo hay que tomar en cuenta que los participantes en el proyecto son todos seres humanos con sus características propias y sus idiosincrasias. Hay poca experiencia con el comportamiento de grupos de personas trabajando en equipo, a distancia, de modo interactivo y simultáneo. Hasta ahora el proceso que se ha seguido en la mayoría de los casos ha sido puramente secuencial. Hace falta por ello estudiar, al nivel de investigación, como se comportan distintos grupos y como funcionaría el proceso mediante experimentos (juegos simulando situaciones reales.)

Instrumentación y control

Durante mucho tiempo se han proyectado estructuras (edificios en particular) con escasa variación en sus topologías, dimensionando sus elementos, o detallando las armaduras y uniones, de forma a resistir de la mejor forma posible las fuerzas impuestas por distintas sollicitaciones (Housner et al., 1997). La idea de aislar estructuras para reducir el efecto de los sismos es muy antigua y en tiempos modernos Frank Lloyd Wright usó ya este concepto en el proyecto del Hotel Imperial de Tokio. Pero se precisó el desarrollo de nuevos materiales para que el uso del aislamiento sísmico cobrara popularidad. Hay ya hoy en día un buen número de edificios y puentes que lo emplean tanto en los Estados Unidos y Japón como en Chile, Argentina, Italia etc. Al mismo tiempo se desarrollaron una serie de procedimientos para controlar las vibraciones de estructuras (edificios de gran altura y puentes muy flexi-

bles) sometidas a la acción del viento. Incluyen estos amortiguadores viscosos y de fricción, amortiguadores líquidos, y amortiguadores con masas deslizantes, entre otros. Todos estos son medios de control pasivo. El control activo de estructuras, modificando sus características (rigidez y frecuencias naturales por ejemplo) al verse sometidas a vibraciones de distintas amplitudes, ha tenido un gran desarrollo en Japón, donde hay varios edificios que lo usan. Su uso se ve restringido hasta ahora por la falta de experiencia y la desconfianza en las fuentes de electricidad requeridas para su funcionamiento: incluso en Japón, los edificios con estos dispositivos se han proyectado de modo a poder resistir el sismo sin daños importantes, con independencia del control activo. A medida que aumenta la experiencia con estos sistemas y la confianza en su funcionamiento es de esperar que se hagan mas populares. Hay también sistemas híbridos de control combinando elementos de control activo y pasivo. Estas técnicas de control pueden extenderse por otra parte más allá del caso sísmico o de vibraciones causadas por el viento, incluyendo modos de reaccionar de la estructura a daños causados por explosivos o incendio, y al deterioro debido al uso normal. Es este un área fértil de investigación y desarrollo en la que los nuevos materiales juegan un papel importante.

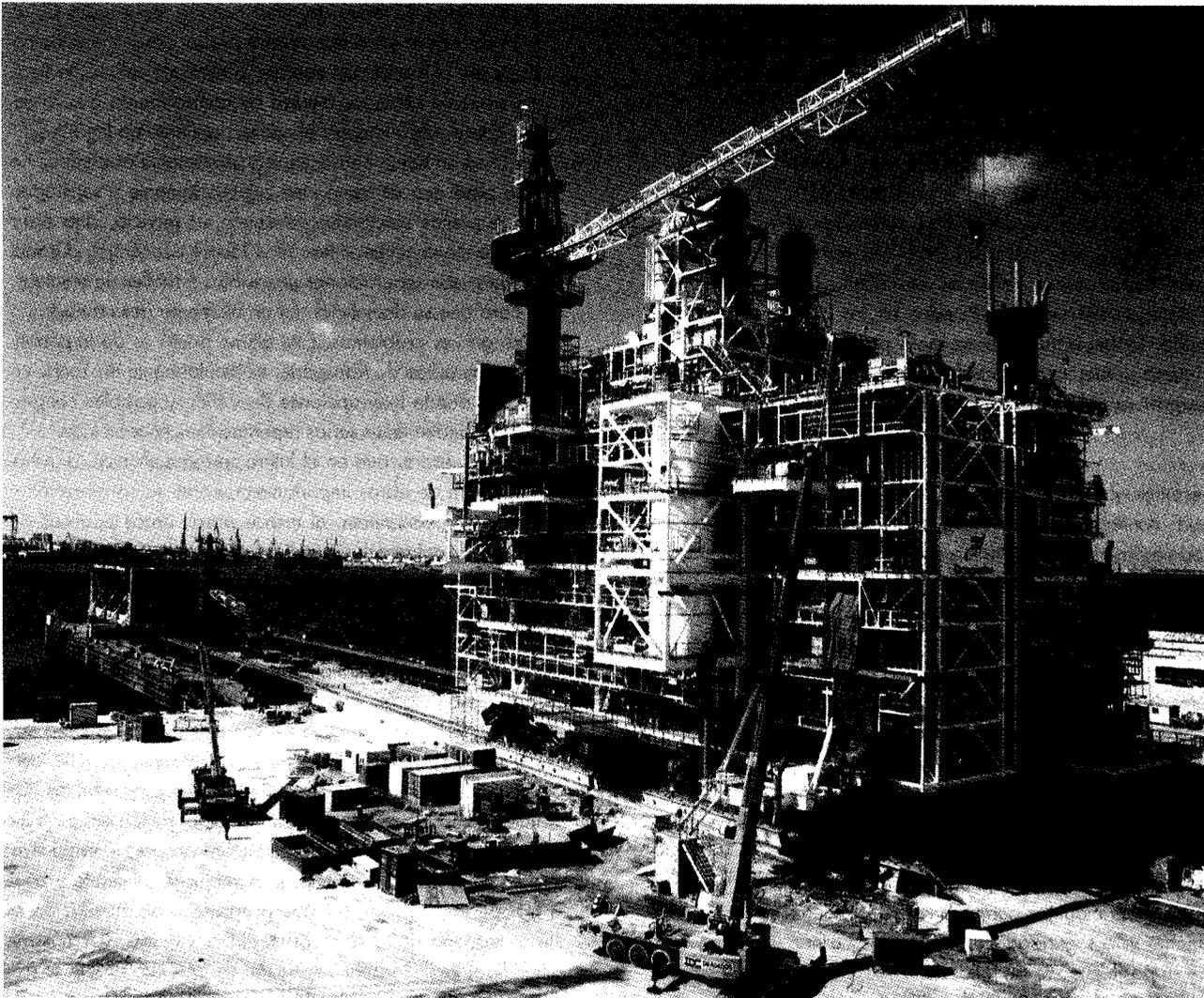
El complemento lógico a la gran capacidad de cálculo y de proceso de datos que proporciona el ordenador y al uso de métodos de control es la posibilidad de tomar mediciones en el terreno o en la estructura, interpretarlas, y reaccionar a posibles alarmas con gran velocidad. Hay una serie de nuevas tecnologías que están empezando ya a revolucionar la forma en que se puede observar y medir el comportamiento de una estructura durante su construcción y a lo largo del tiempo y que pueden tener un gran impacto en el futuro. Tales son los sistemas de información geográfica basados en satélite, sistemas de rayos laser tridimensionales, fibras ópticas, acelerómetros y geófonos de varios tamaños, sensores microscópicos para medir humedad, presión, temperatura, aceleraciones o velocidades con su propia fuente de energía (MEMS), y la telemetría de gran ancho de banda para transmisión de datos sin necesidad de cables. Los micro-sensores no proporcionan todavía la misma precisión que los instrumentos de mayor tamaño, pero su reducido precio permite instalarlos en grandes cantidades. Su uso va a requerir por lo tanto el almacenamiento, proceso e interpretación de una cantidad enorme de datos. Es necesario también estudiar su emplazamiento óptimo y la relación entre las posibles variaciones en los datos de los registros, el grado de daño y su importancia. Todos estos dispositivos son de gran valor para identificar el estado resistente de una estructura debido al uso o a la acción de sollicitaciones extremas como terremotos, vientos huracanados, incendio o explosiones. Permiten además determinar que partes de la obra se encuentran en peligro de colapso,

que partes son accesibles para equipos de socorro, la extensión del fuego y el humo, etc. Es preciso en algunos casos interpretar los datos de los registros y sacar conclusiones con gran rapidez para que sean de utilidad práctica. La creación de los nuevos instrumentos de medida ha ido acompañada por el desarrollo de técnicas de auscultación no destructivas que se usan ya ampliamente en muchos campos (Chang et al., 2003).

Materiales

Los materiales clásicos de las estructuras, piedra, madera, ladrillo, hierro y acero, hormigón, son en general materiales de precio muy reducido por unidad de volumen o peso. Algunos de estos materiales se usaban ya en tiempos inmemoriales y otros se desarrollaron en el siglo XIX. Ha habido sin embargo desarrollos notables en todos ellos durante el siglo XX (laminados de madera, aceros y hormigones de alta y muy alta resistencia, hormigones con resistencia a tracción, hormigones ligeros y con varios aditivos, etc.) Al mismo tiempo se han desarrollado nuevos materiales: plásticos, fiberglass, y más recientemente materiales compuestos con una matriz de resina y fibras de vidrio, carbono, o ambas. Estos materiales han tenido gran difusión en la industria del automóvil, la industria aeronáutica, y la construcción naval, donde el peso juega un papel importante. Su costo es más elevado y por ello su uso en la obra civil ha sido limitado: se usan en cantidades limitadas en plataformas marinas de aguas profundas (para tabiques, forjados, escaleras, barandillas, cables y conductos), para reparación y refuerzo de estructuras de hormigón dañadas por uso, terremotos, o impactos, y como armaduras en losas de algunos puentes. La extensión de su uso depende por un lado de una posible reducción en su precio y de un aumento en las cantidades producidas, y por otro de mayor experiencia con su comportamiento a largo plazo bajo distintas condiciones ambientales. Un problema importante es que algunos de estos materiales pueden sufrir daños internos considerables que no se manifiestan en la superficie hasta que el fallo es inminente, lo que puede tener consecuencias catastróficas. Se requiere por ello instrumentarlos (con fibras y sensores embebidos en el material) para poder diagnosticar pronto su posible deterioro.

La Ciencia de los Materiales, como una nueva rama de la ciencia y la ingeniería, ha cobrado un gran auge en la segunda mitad del siglo XX. Sus avances han sido espectaculares. Se pueden ya proyectar materiales (del mismo modo que se proyectan estructuras) que tengan cualquier combinación deseada de densidad, rigidez y resistencia. Lo que es más, se pueden crear materiales inteligentes cuyas propiedades se ajustan automáticamente como respuesta a distintos impulsos, controlando así su comportamiento y el de la estructura. Algunos materiales pueden repararse a sí



Proceso Constructivo. (Cedida por Dragados S.A.).

mismos. Aunque su costo es elevado estos materiales pueden ser de gran utilidad si se precisan solo en cantidades limitadas para aplicaciones específicas, como complemento a los materiales convencionales. En el siglo XXI el proyectista va a tener a su disposición una gran variedad de materiales y va a poder escoger aquellas combinaciones que proporcionen el mejor comportamiento.

El desarrollo de estos nuevos materiales y las mejoras introducidas en los convencionales ha requerido investigación experimental para estudiar su comportamiento y el establecimiento de leyes matemáticas que lo describan. Estas leyes, o ecuaciones constitutivas, pueden establecerse al nivel macroscópico, el procedimiento tradicional, o al nivel microscópico. En el primer caso se desarrollan leyes más o menos complejas, dependiendo del número de parámetros, para predecir el comportamiento global; en el segundo se parte de relaciones físicas elementales describiendo la interacción entre partículas de dimensiones y

forma arbitrarias y el medio que las rodea (fluido o aire.) Estos modelos de partículas se usaron ya a mediados del siglo XX para explicar el comportamiento de las arenas al nivel de investigación. Con el desarrollo del ordenador se introdujo el método de los elementos «discretos» para describir el comportamiento de suelos inicialmente, y de otros materiales (mampostería y hormigón por ejemplo) después. La idea de establecer modelos a un nivel prácticamente molecular ha cobrado popularidad con el desarrollo de los nuevos materiales y con la disponibilidad de gran capacidad de memoria y velocidad de cálculo (cálculos en paralelo.) Aunque estos modelos no se usen en un futuro inmediato para aplicaciones prácticas de todos los días, su uso en investigación es importante para predecir mejor y explicar el comportamiento físico observado experimentalmente y para obtener así una base para aceptar o rechazar modelos sencillos o establecer los límites de su campo de validez.

Posibles efectos futuros

La previsión del futuro es siempre un tema peligroso y la literatura está repleta de casos de predicciones que hoy en día, a la vista de lo ya acontecido, nos parecen ridículas, pero que fueron hechas en su tiempo por supuestos expertos. Así por ejemplo la predicción, a finales de los 1950, que media docena de ordenadores IBM 704 saturarían el mercado científico hasta finales del siglo. Hoy nos parece lógico el desarrollo de los nuevos métodos de cálculo que aprovechan las ventajas del ordenador, pero en los años 50 nadie lo predijo. Lo importante no es tanto predecir lo que va a ocurrir como prever lo que puede ocurrir e influenciar el que se hagan realidad los acontecimientos deseados.

- Se puede esperar que, a pesar del gran desarrollo que ha ocurrido ya, continuarán a aparecer nuevas formulaciones y metodologías de cálculo, como consecuencia del gran número de personas dedicadas a la Mecánica Computacional.. Será posible usar modelos tridimensionales de estructuras completas que tomen en cuenta el conjunto de la estructura y su cimentación, así como los elementos no estructurales (tabiques por ejemplo) y su interacción con los elementos estructurales. Cabe esperar también que habrá disponibles mejores modelos del comportamiento no lineal de los materiales, basados en claros conceptos físicos, como los que se están desarrollando ahora usando micro-Mecánica al nivel de investigación, y modelos simplificados basados en los resultados obtenidos con estos al nivel práctico. Estos modelos permitirán predecir mejor el comportamiento y la seguridad de estructuras que han sufrido daño y su posible modo de fallo.
- Cabe esperar que la previsión de los posibles riesgos asociados con las incertidumbres en la magnitud de las cargas, las propiedades de los materiales, las dimensiones de la estructura real, y las distintas fases de la construcción, adquieran cada vez mayor importancia, con el desarrollo y uso de formulaciones de tipo probabilístico tanto para el cálculo (determinación de la capacidad resistente de la estructura) como para la planificación y ejecución de la obra. Se requieren ya análisis de riesgo en un número creciente de casos, particularmente en obras de importancia con repercusiones sociales y al estudiar el impacto ecológico. Los conceptos de ingeniería «verde» y de sostenibilidad afectan ya el proyecto de muchos tipos de estructuras y su influencia aumentará al aumentar la participación ciudadana en los proyectos de obras civiles.
- Llegará un día en que el ingeniero pueda proyectar estructuras para que tengan el comportamiento deseado durante su vida, instrumentándolas de forma a recibir, tanto él como el propietario, y quien esté a cargo de su mantenimiento, claras indicaciones de su posible deterioro y de

la necesidad de tomar acciones para su reparación. En algunos casos la estructura misma podrá tomar medidas correctivas, al menos con carácter preliminar. Al mismo tiempo se usarán más los medios de control, tanto pasivo como activo, para mejorar el comportamiento de las estructuras. Podrán como consecuencia proyectarse estructuras no solo para que se comporten adecuadamente y satisfagan los requisitos funcionales al entrar en servicio, sino para que su mantenimiento sea más fácil y económico durante su vida, con reparaciones previsibles o fáciles de efectuar, y para que su demolición en un momento determinado no cree graves problemas. Este último punto es de importancia para obras de transporte, particularmente en zonas urbanas, donde interrupciones de tráfico y posibles congestiones pueden tener serias repercusiones económicas.

- Es de esperar que en el futuro se requiera más la instrumentación de obras importantes durante su construcción y de forma permanente, al menos para obras públicas de importancia (grandes puentes, pavimentos de carreteras, edificios públicos, etc.) Esto llevará a nuevos desarrollos en instrumentación, en los medios de transmisión y proceso de los datos, en la interpretación en tiempo real de los registros, y en el almacenamiento de los resultados.
- Se desarrollarán y usarán más las grandes bases de datos con toda la información sobre el proyecto, la obra terminada y su evolución (mantenimiento y reparaciones), permitiendo finalmente la integración en el proyecto de las distintas componentes de la obra, la colaboración entre los diversos actores, la consideración del proceso constructivo durante el proyecto mismo, y un mejor seguimiento y control de la construcción. Los programas de simulación o construcción virtual se harán realidad y su uso será más extendido, facilitando la inspección de la obra durante su génesis y durante su vida. Todos estos desarrollos van a requerir cambios importantes en la organización y forma de trabajo de muchas oficinas de ingeniería, con un mayor énfasis en el trabajo en equipo y comunicaciones eficaces, al menos para obras de gran tamaño o importancia.

Todos estos desarrollos apuntan a un mejor control del proyecto, de la construcción, y del mantenimiento de las estructuras y a una mayor flexibilidad del proyectista. ■

Referencias:

- CHANG, P. C., FLATAU, A., Y LIU S. C. (2003) "Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure." Structural Health Monitoring Vol 2, No 3, pp. 257-267
- HOUSNER, G. W., et al, (1997) "Structural Control: Past, Present and Future." Special Issue, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, v. 123, n. 9, pp. 897-971
- "ICES STRUDL-II Engineering User's Manual", (1968), Report R68-91, Civil Engineering Dept MIT
- REINSCHMIDT, K. F. (1991), "Integration of Engineering Design and Construction." Journal of Construction Engineering and Management, v.117, n.4, pp. 756-772
- TORROJA, E. (1957) "Razon y Ser de los Tipos Estructurales" Instituto Tecnico de la Construcción y del Cemento Eduardo Torroja.